

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais – PPGEM

**ESTABILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA ELÉTRICA  
COM VISTAS A SUA UTILIZAÇÃO COMO SUBSTITUIÇÃO  
AO CIMENTO**

ANGELA BORGES MASUERO  
Tese para obtenção do título de doutor em Engenharia

Porto Alegre, 2001

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais – PPGEM

## **ESTABILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA ELÉTRICA COM VISTAS A SUA UTILIZAÇÃO COMO SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO**

ANGELA BORGES MASUERO  
Doutora em Engenharia

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais –PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Porto Alegre  
2001



Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração: Metalurgia Extrativa/Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final pelo orientador, co-orientador e pela Banca examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr-Ing. Antonio Cezar Faria Vilela  
Dr. pela Universidade Técnica de Aachen, Alemanha

Co-orientadora: Profª. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra pela Universidade de São Paulo

**Banca Examinadora::**

Paulo José Melaragno Monteiro – Universidade da Califórnia, Berkeley  
Ph.D. pela Universidade da Califórnia em Berkeley

Washington Almeida Moura – UEFS/Bahia  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Jorge Augusto Ceratti – PPGEC/UFRGS  
Dr. Universidade Federal do Rio de Janeiro

Carlos Alberto Mendes Moraes – PPGEM/UFRGS - UNISINOS  
Ph.D. pela University of Manchester and Institut of Science and  
Technology/UMIST/Inglaterra

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
De Minas, Metalúrgica e dos Materiais

Às pessoas mais importantes da minha vida  
A quem muito amo

Guilherme e Carolina,  
João,  
Luiz (*in memorium*) e Gladys

## AGRADECIMENTOS

O final deste trabalho, como fruto de uma caminhada onde muitos desafios foram vencidos, foi possível, graças a uma parcela de esforço pessoal, mas também em grande parte pelo apoio de muitas pessoas, as quais gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos.

A Antonio C. Vilela e Denise Dal Molin, dois exemplos de competência, profissionalismo e justiça, transcendendo o papel de orientador, muito aprendi, não apenas da parte técnica, mas também do lado humano e de quem sempre levarei toda admiração, respeito e amizade.

Ao João, por todas discussões técnicas e questionamentos, por me ajudar a ter calma e buscar alternativas para quando achava que estava tudo perdido ou que o forno não voltaria a funcionar, pela paciência e compreensão, por assumir todas as responsabilidades com as crianças nos últimos meses para que eu conseguisse concluir este trabalho, pelas noites acordado para fazer companhia enquanto trabalhava. E pelo apoio e entusiasmo, por me ajudar achar forças, que parecia não mais ter, para chegar ao final da tese.

Ao Guilherme e Carolina, que apesar da idade entenderam os “nãos” ditos muitas vezes aos seus convites para brincar, pois a mãe tinha de trabalhar.

Ao Washington Moura, grande amigo, com quem trabalhei desde o início da tese, cujas discussões técnicas ajudaram no meu crescimento profissional. O companheirismo em todos os momentos, com certeza me ajudou a concluir este trabalho.

Ao Maurício Mancio, por todo apoio e competência, persistência e por acreditar no que estávamos estudando, graças ao que foi possível desenvolver o processo de granulação da escória.

Ao Carlos Moraes, pela amizade, discussões técnicas e sua ajuda com a operação do forno para a granulação da escória, que foi fundamental para viabilizar a minha tese.

Aos colegas professores do NORIE e à UFRGS, que possibilitaram o meu afastamento para a realização do doutorado.

Ao grupo de materiais do NORIE, em especial Fernanda, Marlova, Águida, Adriana Gumiere, Adriana Silveira, Daniel, Diana, Ludimila, Paulo Sérgio, Jairo, Martina, Patrícia, pelo companheirismo, apoio em todas as horas e amizade.

À Rosana e Lucília, pelo apoio e amizade.

Aos auxiliares de pesquisa, Gustavo, Anelise, Alexandre, Luís, Raul, Fabiano e Guilherme, que participaram da primeira fase da tese, pela dedicação e amizade.

À Juliana, Márcio, Pettermann, Diego e Cleomar, auxiliares da pesquisa na final da tese, onde passávamos semanas no laboratório moldando argamassas, pela ajuda, empenho e amizade.

À Mônica e Valéria, pela amizade.

Ao Éderson, por estar sempre disponível para auxiliar, não poupando fins-de-semana para ajudar no processo de granulação da escória.

Ao Fontes, Airton, Flávio e Teixerinha pela amizade e todo apoio dado na realização das atividades de laboratório.

Ao pessoal do LASID, em especial a Feliciane, Eduardo, Daniela, Leila, Anderson, que acolheu esta engenheira civil e com quem aprendi um pouco de engenharia metalúrgica, engenharia química e química.

À Fundação Ciência e Tecnologia (CIENTEC), na pessoa do Eng. Recena, que permitiu a realização de alguns ensaios.

À June, pelo auxílio na revisão das referências bibliográficas.

À Sobremetal pelo fornecimento das escórias.

À Gerdau Aços Finos Piratini, na pessoa do arquiteto Itajaíba, que permitiu a realização de pré-testes na siderúrgica.



## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xv</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xx</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 RESÍDUOS, PRESERVAÇÃO AMBIENTAL E CONSTRUÇÃO CIVIL.....	1
1.2 OBJETIVOS .....	3
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	4
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	5
<b>2 PRODUÇÃO DO AÇO - GERAÇÃO E BENEFICIAMENTO DAS ESCÓRIAS.....</b>	<b>6</b>
2.1 TIPOS DE RESFRIAMENTO DAS ESCÓRIAS.....	10
2.1.1 Resfriamento ao ar .....	10
2.1.2 Resfriamento controlado com água.....	10
2.1.3 Resfriamento brusco com água ou ar .....	11
2.2 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DA ESCÓRIA NA INDÚSTRIA.....	11
<b>3 UTILIZAÇÕES DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA .....</b>	<b>14</b>
3.1 USO EM PAVIMENTAÇÃO.....	14
3.2 Uso em Concretos e argamassas de cimento portland.....	21
3.2.1 Utilização como matéria-prima ao cimento.....	21
3.2.2 Utilização como adição a concretos .....	25
3.2.3 Utilização como agregado .....	27
<b>4 CARACTERIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS .....</b>	<b>37</b>
4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA.....	37
4.2 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS .....	40
4.3 REATIVIDADE DAS ESCÓRIAS.....	40
4.4 ESTRUTURA DAS ESCÓRIAS.....	42
4.5 HIDRATAÇÃO DAS ESCÓRIAS .....	44
<b>5 FENÔMENO DA EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS.....</b>	<b>46</b>
5.1 AGENTES E MECANISMOS CAUSADORES DA EXPANSÃO .....	46
5.1.1 Óxido de Cálcio livre .....	46
5.1.2 Óxido de Magnésio livre (Periclásio).....	53
5.1.3 Silicato dicálcico.....	55
5.1.4 Óxidos de ferro .....	57
5.2 MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DAS ESCÓRIAS .....	58

5.2.1	Ensaio físico de avaliação da expansão das escórias de aciaria.....	58
5.2.2	Ensaio de quantificação dos possíveis agentes causadores da expansão das escórias .....	67
5.3	ESTABILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS .....	69
5.3.1	Estabilização da escória no estado sólido.....	69
5.3.2	Estabilização da escória no estado líquido.....	71
<b>6</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL: PROCESSO DE RESFRIAMENTO BRUSCO DA ESCÓRIA.....</b>	<b>73</b>
6.1	DEFINIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL E ESTUDOS PRELIMINARES .....	73
6.2	EQUIPAMENTOS E MÉTODOS UTILIZADOS .....	76
6.3	ESCOLHA DA ESCÓRIA A SER ESTUDADA E COLETA DA AMOSTRA .....	76
6.4	PROPRIEDADES E MÉTODOS DE CONTROLE DA ESCÓRIA ANTES DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO BRUSCO (EA3) .....	78
6.4.1	Propriedades físico-químicas.....	78
6.4.2	Composição mineralógica .....	79
6.4.3	Expansibilidade.....	79
6.4.4	Propriedades de importância ambiental.....	83
6.5	PROCESSO DE RESFRIAMENTO BRUSCO.....	85
6.6	PROPRIEDADES E MÉTODOS DE CONTROLE DA ESCÓRIA (EA3) APÓS O PROCESSO DE RESFRIAMENTO BRUSCO (EA3-G).....	87
6.6.1	Propriedades físico-químicas.....	88
6.6.2	Composição mineralógica .....	91
6.6.3	Expansibilidade.....	93
6.6.4	Propriedades de importância ambiental.....	94
6.6.5	Atividade pozzolânica .....	96
6.7	VALIDAÇÃO DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO BRUSCO: RESFRIAMENTO DA ESCÓRIA ANTES DO BENEFICIAMENTO (EA4) E DA ESCÓRIA DE UMA OUTRA SIDERÚRGICA (EA5) .....	99
6.7.1	Expansibilidade.....	103
6.7.2	Avaliação da atividade pozzolânica com cimento .....	104
6.8	CONCLUSÕES .....	105
<b>7</b>	<b>VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA GRANULADA COMO SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO .....</b>	<b>106</b>
7.1	MATERIAIS EMPREGADOS.....	107
7.1.1	Cimento .....	107
7.1.2	Agregado Miúdo .....	107
7.1.3	Escória de Aciaria Elétrica Granulada (ACIGRAN).....	107
7.1.4	Escória de alto-forno .....	107
7.2	PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS.....	108
7.3	DESEMPENHO MECÂNICO: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	109
7.3.1	Quantidade de Materiais.....	109
7.3.2	Equipamentos Utilizados .....	111
7.3.3	Apresentação dos Resultados.....	111
7.3.4	Análise e Discussão dos Resultados.....	117

7.3.5	Conclusões.....	135
7.4	CARACTERIZAÇÃO DO PONTO DE VISTA AMBIENTAL DAS ARGAMASSAS .....	136
7.5	DURABILIDADE DAS ARGAMASSAS.....	137
7.5.1	Absorção de Água.....	138
7.5.2	Ensaio de Absorção por Imersão (NBR 9878 , 1990).....	146
7.5.3	Conclusões sobre os resultados de absorção de água .....	152
7.5.4	Ataque por Cloretos .....	152
7.5.5	Ensaio de Carbonatação Acelerada .....	170
7.5.6	Resistência ao Sulfato .....	184
7.6	RESUMO DAS PROPRIEDADES ESTUDADAS .....	199
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>203</b>
8.1	QUANTO AO RESFRIAMENTO E A ESCÓRIA GERADA (ACIGRAN).....	203
8.2	QUANTO ÀS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS COM ACIGRAN NO ESTADO FRESCO .....	204
8.3	QUANTO ÀS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS COM ACIGRAN NO ESTADO ENDURECIDO.....	204
8.3.1	Características Físicas e Propriedades Mecânicas.....	204
8.3.2	Durabilidade.....	205
<b>9</b>	<b>SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS .....</b>	<b>207</b>
<b>10.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>208</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>223</b>	
<b>Anexo 1:</b>	Avaliação das modificações químicas, físicas, mineralógicas e microestruturais das escórias de aciaria elétrica ao longo do tempo.....	224
<b>Anexo 2:</b>	Distribuição granulométrica da escória verde (EA3) e ACIGRAN (EA3-G).....	252
<b>Anexo 3:</b>	Ganho de massa por elemento de escória devido à contribuição do cadinho.....	255
<b>Anexo 4:</b>	Ganho de massa ao longo do tempo no ensaio de sucção capilar – Método Kelham.....	257
<b>Anexo 5:</b>	Corrente elétrica e evolução da quantidade de cloretos ao longo do tempo por traço e teor de substituição .....	264



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Evolução anual da produção do aço (a) mundial (b) nacional .....	6
<b>Figura 2.2</b>	Representação esquemática da produção do ferro-gusa e processos de produção do aço, com suas respectivas etapas de geração de escórias.....	7
<b>Figura 2.3</b>	Representação esquemática do processo de refino do aço através de forno elétrico a arco.....	8
<b>Figura 2.4</b>	Processo de refino do aço através de conversor LD.....	9
<b>Figura 2.5</b>	Produção de aço bruto por processo (a) mundial (b) nacional .....	9
<b>Figura 2.6</b>	(a) Escória sendo vertida na baía de escória na aciaria; (b) Área destinada ao resfriamento da escória recém vinda da aciaria, mostrando, em detalhe, o dispositivo aspersor de água usado para o resfriamento; (c) Aglutinação das partículas de escórias em placas de grandes dimensões por não terem recebido ação da água; (d) Vista geral da planta de beneficiamento; (e) Detalhe do ferro recuperado pelo eletroímã; (f) Detalhe da esteira (parte inferior da foto) que leva a escória que não atingiu a granulometria adequada para o início do processo. O funcionário acompanha ao lado para verificar se não restou algum pedaço de ferro de grande dimensão que possa ser retirado. ....	12
<b>Figura 2.7</b>	(a) Detalhe da saída da escória do ciclo de britagem (b) Área de armazenamento da escória “verde”; (c) Detalhe da escória verde; (d) Vista geral da escória estocada no pátio por um período superior a 12 meses, onde observa-se, no canto superior direito, que o material é mais coeso e sólido; (e) e (f) Detalhe da escória curada, com a presença de pontos brancos, onde evidencia-se a carbonatação do óxido de cálcio. ....	13
<b>Figura 3.1</b>	Resistência à compressão em pastas (LIMA, 1999).....	26
<b>Figura 3.2</b>	Resistência à compressão em concretos (LIMA, 1999) .....	29
<b>Figura 3.3</b>	Resistência à flexão em concretos (LIMA, 1999).....	29
<b>Figura 4.1</b>	Representação esquemática do tetraedro Si-O e estrutura da sílica no estado (a) sólido (b) líquido ( MILLS, 1995) .....	43
<b>Figura 4.2</b>	Efeito da adição de um cátion à sílica líquida ( JEFFES, 1975) .....	44
<b>Figura 4.3</b>	Representação esquemática da estrutura após adição sucessiva de cátions (JEFFES, 1975) .....	44
<b>Figura 5.1</b>	Diagrama de equilíbrio ternário de escórias LD (SLAG ATLAS, 1981).....	46
<b>Figura 5.2</b>	Processo de desagregação da escória: (a) água em contato com CaO livre presente na escória (b) volume inicial e final dos componentes (d) volume ocupado pelo produto de hidratação na rede cristalina da escória .....	49
<b>Figura 5.3</b>	Basicidade da escória em função da cal livre (DAIDO STEEL, 1993).....	52
<b>Figura 5.4</b>	Aumento de volume em função do estado de oxidação (MEHTA e MONTEIRO, 1994) ....	58
<b>Figura 5.5</b>	Ensaio de expansibilidade aplicados a escórias.....	59
<b>Figura 6.1</b>	Fluxograma das atividades desenvolvidas no programa experimental.....	74
<b>Figura 6.2</b>	Fissuras internas de escórias expostas (a) 3 anos e 6 meses em ambiente natural. Ampliação 120 x (b) 4 anos e 6 meses exposta em cura úmida. Ampliação 75 x.....	75
<b>Figura 6.3</b>	Representação esquemática dos locais de amostragem da escória.....	78



<b>Figura 6.4</b>	Difratograma de raios-x da escória de aciaria elétrica a ser granulada (EA3) .....	79
<b>Figura 6.5</b>	Expansibilidade da escória verde (EA3) avaliada através do método das barras.....	82
<b>Figura 6.6</b>	Expansibilidade da escória verde (EA3) avaliada através do ensaio de dilatação preconizado pela JIS A 5015 .....	83
<b>Figura 6.7</b>	Cadinho de carbetto de silício com escória a ser fundida .....	86
<b>Figura 6.8</b>	(a) Remoção do cadinho após permanência no forno durante 50 min na temperatura de 1450° C (b) Detalhe do cadinho sendo retirado do forno para ser vertido.....	87
<b>Figura 6.9</b>	(a) Resfriamento brusco da escória em água a temperatura ambiente (b) Detalhe da escória sendo vertida em água.....	87
<b>Figura 6.10</b>	Aspecto da escória (EA3) antes do processo de resfriamento brusco(a) nas dimensões resultantes do atual sistema de beneficiamento (b) finamente moída .....	88
<b>Figura 6.11</b>	Aspecto da escória após processo de resfriamento brusco (EA3-G) (a) na granulometria tal qual gerada (b) finamente moída .....	88
<b>Figura 6.12</b>	Fase metálica separada durante o processo de resfriamento brusco.....	88
<b>Figura 6.13</b>	Diagrama de RICHARDSON - ELLINGHAM ( FROHBERG, 1980).....	90
<b>Figura 6.14</b>	Difratograma da raio-x da fase metálica separada da escória .....	92
<b>Figura 6.15</b>	Difratograma de raios x da escória após resfriamento brusco (EA3-G).....	93
<b>Figura 6.16</b>	Expansibilidade da escória ACIGRAN (EA3-G) avaliada através do método das barras.....	94
<b>Figura 6.17</b>	Índice de atividade pozolânica da ACIGRAN determinado pelo método químico (NBR 5753,1991).....	98
<b>Figura 6.18</b>	Difratograma de raios-x da escória com fase metálica (a) antes do resfriamento brusco (EA4) (b) após o resfriamento brusco (EA4 – G).....	101
<b>Figura 6.19</b>	Difratograma de raios-x da escória com fase metálica da siderúrgica 2 (a) antes do resfriamento brusco (EA5) (b) após o resfriamento brusco (EA5 – G).....	102
<b>Figura 6.20</b>	Expansibilidade da escória EA4-G avaliada através do método das barras.....	104
<b>Figura 7.1</b>	Propriedades avaliadas nas argamassas com escória de aciaria granulada (ACIGRAN – EA3-G) .....	106
<b>Figura 7.2</b>	Resistência à compressão axial, ao longo do tempo, das argamassas de traço 1: 1,5 .....	112
<b>Figura 7.3</b>	Resistência à compressão axial , ao longo do tempo, das argamassas argamassas de traço 1: 3,0.....	113
<b>Figura 7.4</b>	Resistência à compressão axial , ao longo do tempo, das argamassas de traço 1: 4,5.....	114
	Resistência à compressão, ao longo do tempo, de argamassas de traço 1: 1,5 com escórias de alto-forno (EAF-G). .....	116
<b>Figura 7.6</b>	Resistência à compressão, ao longo do tempo, de argamassas de traço 1: 3,0 com escórias de alto-forno (EAF-G).....	116
<b>Figura 7.7</b>	Resistência à compressão, ao longo do tempo, de argamassas de traço 1: 4,5 com escórias de alto-forno (EAF-G).....	117
<b>Figura 7.8</b>	Efeito da idade na resistência à compressão das argamassas.....	118
<b>Figura 7.9</b>	Efeito do traço na resistência à compressão das argamassa.....	118
<b>Figura 7.10</b>	Efeito da interação entre traço e idade na resistência à compressão das argamassas .....	119
<b>Figura 7.11</b>	Influência do teor de substituição na resistência à compressão das argamassas.....	119



<b>Figura 7.12</b> Efeito da interação da idade e do teor de substituição na resistência à compressão das argamassas .....	120
<b>Figura 7.13</b> Micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários ; Ampliação 400 x. Pasta com 3 dias de idade (a) Referência (b) 10 % de ACIGRAN (c) 30 % de ACIGRAN (d) 50 % de ACIGRAN .....	121
<b>Figura 7.14</b> Micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários ; Ampliação 1600 x. Pasta com 3 dias de idade (a) Referência (b) 10 % de ACIGRAN (c) 30 % de ACIGRAN (d) 50 % de ACIGRAN .....	122
<b>Figura 7.15</b> Micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários ; Ampliação 400 x. Pasta com 7 dias de idade (a) Referência (b) 10 % de ACIGRAN (c) 30 % de ACIGRAN (d) 50 % de ACIGRAN .....	123
<b>Figura 7.16</b> Micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários ; Ampliação 1600 x. Pasta com 7 dias de idade (a) Referência (b) 10 % de ACIGRAN (c) 30 % de ACIGRAN (d) 50 % de ACIGRAN .....	124
<b>Figura 7.17</b> Micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários ; Ampliação 1600 x. Pasta com 28 dias de idade (a) Referência (b) 10 % de ACIGRAN (c) 30 % de ACIGRAN (d) 50 % de ACIGRAN .....	125
<b>Figura 7.18</b> Micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários ; Ampliação 1600 x. Pasta com 91 dias de idade (a) Referência (b) 10 % de ACIGRAN (c) 30 % de ACIGRAN (d) 50 % de ACIGRAN .....	126
<b>Figura 7.19</b> Influência do teor de substituição da escória na quantidade de hidróxido de cálcio .....	128
<b>Figura 7.20</b> Porcentagem de água não evaporável em função do teor hidróxido de cálcio .....	131
<b>Figura 7.21</b> Porcentagem de sólidos hidratados em função do teor hidróxido de cálcio .....	131
<b>Figura 7.22</b> Resistência à compressão de argamassas em função da escória utilizada .....	133
<b>Figura 7.23</b> Influência da interação da idade e do tipo de escória na resistência à compressão .....	133
<b>Figura 7.24</b> Influência da interação do traço e do tipo de escória na resistência à compressão .....	134
<b>Figura 7.25</b> Influência da interação da idade, do traço e do tipo de escória na resistência à compressão .....	134
<b>Figura 7.26</b> Influência da interação do traço, do teor e do tipo de escória na resistência à compressão .....	134
<b>Figura 7.27</b> Desenho esquemático da origem dos corpos-de-prova de prova a serem submetidos ao ensaio de sucção capilar .....	139
<b>Figura 7.28</b> Corpos-de-prova obtidos a partir do corte dos prismas de 100 x100x150 mm .....	139
<b>Figura 7.29</b> Impermeabilização das faces laterais dos corpos-de-prova .....	140
<b>Figura 7.30</b> Dispositivo do ensaio de sucção capilar .....	142
<b>Figura 7.31</b> Efeito do traço na taxa de absorção das argamassas .....	145
<b>Figura 7.32</b> Efeito do traço na resistência capilar das argamassas .....	145
<b>Figura 7.33</b> Corpos-de-prova em imersão total – Ensaio de absorção por imersão .....	147
<b>Figura 7.34</b> Absorção por imersão (NBR 9878, 1990) .....	149
<b>Figura 7.35</b> Índice de vazios após imersão (NBR 9878, 1990) .....	149
<b>Figura 7.36</b> Comportamento das argamassas quanto a absorção por imersão em função dos diferentes teores de escórias ACIGRAN .....	150
<b>Figura 7.37</b> Absorção por imersão de argamassas em função do proporcionamento dos materiais .....	150
<b>Figura 7.38</b> Interação do teor de ACIGRAN e traço na absorção por imersão de argamassas .....	151



<b>Figura 7.39</b> Posicionamento das seis câmaras positivas dentro da negativa, com fonte de tensão ligada a chapa de aço inoxidável e eletrodos.....	153
<b>Figura 7.40</b> Equipamentos utilizados para determinação da quantidade de cloretos (agitador eletromagnético, eletrodos de referência, íon seletivo ao cloreto e condensador e íon analisador, da esquerda para direita) .....	154
<b>Figura 7.41 (a)</b> Dispositivo e <b>(b)</b> corpo-de-prova para o ensaio de migração de cloretos .....	155
<b>Figura 7.42 (a)</b> Corpo-de-provas já posicionados na câmara positiva prontos para serem ensaiados.....	155
<b>Figura 7.43</b> Coeficiente de difusão de argamassas com ACIGRAN .....	157
<b>Figura 7.44</b> Efeito do traço no coeficiente de difusão.....	158
<b>Figura 7.45</b> Micrografia da argamassa 1: 1,5 sem ACIGRAN, elétrons secundários <b>(a)</b> magnitude 100 x <b>(b)</b> 400 x <b>(c)</b> 400 x <b>(d)</b> 800 x <b>(e)</b> 1600 x.....	160
<b>Figura 7.46</b> Micrografia da argamassa 1: 1,5 com 10% de ACIGRAN, elétrons secundários <b>(a)</b> magnitude 100 x <b>(b)</b> 200 x, detalhe da figura 7.46 <b>(a)</b> <b>(c)</b> 100 x <b>(d)</b> 400 x <b>(e)</b> 1600 x <b>(f)</b> 1600 x.....	161
<b>Figura 7.47</b> EDS da partícula esférica não hidratada de escória da figura 7.48 (f).....	162
<b>Figura 7.48</b> Micrografia da argamassa 1: 1,5 com 30% de ACIGRAN, elétrons secundários <b>(a)</b> magnitude 100 x <b>(b)</b> 400 x <b>(c)</b> 400 x <b>(d)</b> eds do depósito de coloração branca sobre o agregado (superfície lisa mais escura).....	162
<b>Figura 7.49</b> Micrografia da argamassa 1: 1,5 com 50% de ACIGRAN, elétrons secundários <b>(a)</b> magnitude 100 x <b>(b)</b> 400 x <b>(c)</b> 1600 x <b>(d)</b> eds do ponto 1 da fig. 7.49 (c).....	163
<b>Figura 7.50</b> Micrografia da argamassa 1: 3,0 sem escória, elétrons secundários <b>(a)</b> magnitude 100 x <b>(b)</b> 400 x <b>(c)</b> 800 x <b>(d)</b> 1600 x .....	164
<b>Figura 7.51</b> Micrografia da argamassa 1: 3,0 com 10% de ACIGRAN, elétrons secundários <b>(a)</b> magnitude 100 x <b>(b)</b> 400 x <b>(c)</b> EDS do ponto 1 fig. 7.51 <b>(b)</b> <b>(d)</b> EDS do ponto 2 fig. 7.51 <b>(b)</b> <b>(e)</b> 800 x <b>(f)</b> 1600 x .....	165
<b>Figura 7.52</b> Micrografia da argamassa 1: 3,0 com 30% de ACIGRAN, elétrons secundários <b>(a)</b> magnitude 100 x <b>(b)</b> 400 x <b>(c)</b> 1600 x.....	166
<b>Figura 7.53</b> Micrografia da argamassa 1: 3,0 com 50% de ACIGRAN, elétrons secundários <b>(a)</b> magnitude 100 x <b>(b)</b> 400 x <b>(c)</b> 1600 x.....	166
<b>Figura 7.54</b> Micrografia da argamassa 1: 4,5 sem ACIGRAN <b>(a)</b> magnitude 100 x <b>(b)</b> 400x .....	167
<b>Figura 7.55</b> Micrografia da argamassa 1: 4,5 com 10% de ACIGRAN <b>(a)</b> magnitude 100 x <b>(b)</b> 200x ..	167
<b>Figura 7.56</b> Micrografia da argamassa 1: 4,5 com 30 % de ACIGRAN <b>(a)</b> magnitude 400 x <b>(b)</b> 160x..	167
<b>Figura 7.57</b> Micrografia da argamassa 1: 4,5 com 50% de ACIGRAN, elétrons secundários <b>(a)</b> magnitude 100 x <b>(b)</b> 400 x <b>(c)</b> 800 x <b>(d)</b> 1600 x.....	168
<b>Figura 7.58 (a)</b> depósito de cloreto de sódio sobre as superfícies dos corpos-de-prova 1: 1,5, em contato com a câmara negativa, após o término do ensaio; <b>(b)</b> depósito de óxido de ferro, decorrente provavelmente da oxidação do eletrodo, sobre a superfície dos corpos-de-prova 1: 1,5, em contato com a solução da câmara positiva, no final do ensaio. ....	168
<b>Figura 7.59 (a)</b> depósito de cloreto de sódio sobre as superfícies dos corpos-de-prova 1: 3,0 em contato com a câmara negativa, após o término do ensaio; <b>(b)</b> depósito de óxido de ferro, decorrente provavelmente da oxidação do eletrodo, sobre a superfície dos corpos-de-prova 1: 3,0 em contato com a solução da câmara positiva, no final do ensaio. ....	169
<b>Figura 7.60 (a)</b> depósito de cloreto de sódio sobre as superfícies dos corpos-de-prova 1: 4,5, em contato com a câmara negativa, após o término do ensaio; <b>(b)</b> depósito de óxido de ferro, decorrente provavelmente da oxidação do eletrodo, sobre a superfície dos corpos-de-prova 1: 4,5, em contato com a solução da câmara positiva, no final do ensaio. ....	169



<b>Figura 7.61</b> Representação esquemática da câmara de carbonatação (JOHN, 1995) .....	170
<b>Figura 7.62</b> Corpos-de-prova posicionados na câmara de sazamento.....	171
<b>Figura 7.63</b> Posicionamento dos corpos-de-prova no interior da câmara de carbonatação acelerada .....	172
<b>Figura 7.64</b> Aspecto dos corpos-de-prova após aspersão de fenoftaleína, do traço 1: 4,5 e 1: 3,0, da esquerda para direita, na idade de 14 dias.....	175
<b>Figura 7.65</b> Aspecto dos corpos-de-prova de argamassa após aspersão de fenoftaleína, na idade de 56 dias, (a) traço 1: 1,5 e (b) traço 1: 3,0. ....	175
<b>Figura 7.66</b> Aspecto do corpo-de-prova após aspersão de indicador de fenoftaleína, aos 14 dias, em argamassas com 10% de AciGran (a) traço 1: 3,0 e (b) traço 1: 4,5.....	176
<b>Figura 7.67</b> Aspecto do corpo-de-prova após aspersão de indicador de fenoftaleína, aos 14 dias, em argamassas com 30% de AciGran (a) traço 1: 3,0 e (b) traço 1: 4,5.....	176
<b>Figura 7.68</b> Aspecto do corpo-de-prova após aspersão de indicador de fenoftaleína, aos 14 dias, em argamassas com 50% de AciGran (a) traço 1: 3,0 e (b) traço 1: 4,5.....	176
<b>Figura 7.69</b> Aspecto das argamassas com 0%, 10%, 30%, 50% de ACIGRAN , de baixo para cima na fotografia, após 28 dias em câmara acelerada de carbonatação, após aspersão de indicador de fenoftaleína (a) traço 1: 1,5 (b) traço 1: 3,0 (c) traço 1: 4,5.....	177
<b>Figura 7.70</b> Aspecto das argamassas com 0%, 10%, 30%, 50% de ACIGRAN, de baixo para cima na fotografia, após 56 dias em câmara acelerada de carbonatação, após aspersão de indicador de fenoftaleína (a) traço 1: 1,5 (b) traço 1: 3,0 (c) traço 1: 4,5.....	177
<b>Figura 7.71</b> Aspecto das argamassas com 0%, 10%, 30%, 50% de ACIGRAN, de baixo para cima na fotografia, após 91 dias em câmara acelerada de carbonatação, após aspersão de indicador de fenoftaleína (a) traço 1: 1,5 (b) traço 1: 3,0 .....	178
<b>Figura 7.72</b> Aspecto das argamassas com 0%, 10%, 30%, 50% de ACIGRAN, de baixo para cima na fotografia, após 120 dias em câmara acelerada de carbonatação, após aspersão de indicador de fenoftaleína (a) traço 1: 1,5 (b) traço 1: 3,0.....	178
<b>Figura 7.73</b> Efeito do traço na profundidade de carbonatação .....	179
<b>Figura 7.74</b> Influência do teor de substituição na profundidade de carbonatação .....	180
<b>Figura 7.75</b> Influência da idade na profundidade de carbonatação.....	181
<b>Figura 7.76</b> Efeito da interação entre o teor de substituição eo traço na profundidade de carbonatação. ....	182
<b>Figura 7.77</b> Efeito da interação entre a idade e o traço na profundidade de carbonatação.....	183
<b>Figura 7.78</b> Efeito da interação entre a idade e o teor na profundidade de carbonatação .....	183
<b>Figura 7.79</b> Aspecto das argamassas de traço 1:1,5 após 270 dias imersos em solução de (a) 5 % NaSO <sub>4</sub> e (b) água com cal.....	185
<b>Figura 7.80</b> Aspecto das argamassas de traço 1:3,0 após 270 dias imersos em solução de (a) 5 % NaSO <sub>4</sub> e (b) água com cal.....	186
<b>Figura 7.81</b> Aspecto das argamassas de traço 1:4,5 após 270 dias imersos em solução de (a) 5 % NaSO <sub>4</sub> e (b) água com cal.....	186
<b>Figura 7.82</b> Efeito do tipo de solução na resistência à tração na flexão.....	188
<b>Figura 7.83</b> Efeito do teor de ACIGRAN na resistência à tração na flexão de argamassas imersas em (a) solução de NaSO <sub>4</sub> e (b) água com cal .....	189
<b>Figura 7.84</b> Efeito da interação do teor de ACIGRAN, traço e solução de imersão dos corpos-de-prova.....	.....
<b>Figura 7.85</b> Índice de resistência química de argamassas com escórias ACIGRAN .....	192
<b>Figura 7.86</b> Efeito do traço no índice de resistência química “R” .....	193

<b>Figura 7.87</b> Influência da interação do traço e do teor das argamassas no índice de resistência química “R” .....	193
<b>Figura 7.88</b> Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 1,5 (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x .....	194
<b>Figura 7.89</b> Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 1,5 com 10% de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x .....	195
<b>Figura 7.90</b> Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 1,5 com 30 % de ACIGRAN, identificando a existência de etringita livre (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x .....	195
<b>Figura 7.91</b> Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 1,5 com 50 % de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x .....	195
<b>Figura 7.92</b> Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 3,0 (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x .....	196
<b>Figura 7.93</b> Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 3,0 com 10 % de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x .....	196
<b>Figura 7.94</b> Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 3,0 com 30 % de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x .....	196
<b>Figura 7.95</b> Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 3,0 com 50 % de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x .....	197
<b>Figura 7.96</b> Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 4,5 (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x .....	197
<b>Figura 7.97</b> Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 4,5 com 10 % de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x .....	198
<b>Figura 7.98</b> Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 4,5 com 30 % de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x .....	198
<b>Figura 7.99</b> Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 4,5 com 50 % de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x .....	199



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b>	Faixas granulométricas de agregados siderúrgicos para uso em macadame hidráulico (BURNIER et al., 1988).....	16
<b>Tabela 3.2</b>	Controle externo da escória de aciaria elétrica em aplicações rodoviárias (GARCIA et al., 1999) .....	19
<b>Tabela 3.3</b>	Ensaio típicos para agregados para pavimentação .....	20
<b>Tabela 3.4</b>	Composição e análise das seis diferentes misturas (MONSHI e ASGARANI, 1999).....	23
<b>Tabela 3.5</b>	Propriedades físicas dos cimentos produzidos e análise de fases por difração de raio-x (MONSHI e ASGARANI, 1999).....	24
<b>Tabela 3.6</b>	Características dos concretos confeccionados para o estudo do comportamento mecânico e de durabilidade (LIMA, 1999) .....	28
<b>Tabela 3.7</b>	Traços utilizados e ganho de resistência das argamassas com escória de aciaria como agregado miúdo (IDEMITSU et al. (1981)).....	31
<b>Tabela 3.8</b>	Composição mineralógica dos agregados de escória oxidante (MORINO e IWATSUKI, 1999).....	32
<b>Tabela 3.9</b>	Proporcionamento empregado na produção dos concretos (MONTGOMERY e WANG, 1991).....	33
<b>Tabela 3.10</b>	Distribuição granulométrica do agregado de escória (MONTGOMERY e WANG, 1991)	33
<b>Tabela 3.11</b>	Quantidade de materiais empregados e resultados de resistência à compressão .....	34
<b>Tabela 4.1</b>	Composição química das escórias de aciaria elétrica.....	38
<b>Tabela 4.2</b>	Composição química das escórias de conversores LD.....	38
<b>Tabela 4.3</b>	Principais fases minerais associadas às escórias de aciaria.....	39
<b>Tabela 4.4</b>	Propriedades Físicas e mecânicas das escórias de aciaria .....	40
<b>Tabela 4.5</b>	Índice de hidraulicidade (COALE et al., 1973; CALLEJA, 1982; BATTAGIN, 1986; NBR 5735,1991; CINCOTTO, 1992).....	42
<b>Tabela 5.1</b>	Reações envolvendo o óxido de cálcio .....	49
<b>Tabela 5.2</b>	Reações envolvendo o óxido de magnésio .....	55
<b>Tabela 5.3</b>	Densidade das diversas modificações do silicato bicálcico (DNER, 1988).....	56
<b>Tabela 5.4</b>	Reações envolvendo o elemento ferro .....	57
<b>Tabela 5.5</b>	Granulometria do material a ser empregado no ensaio de dilatação, conforme norma JIS 5015 .....	60
<b>Tabela 5.6</b>	Comparativo entre os parâmetros dos ensaios de expansão por imersão .....	61
<b>Tabela 5.7</b>	Máximas expansões admissíveis para agregados de escórias (N 242 E/ 1995).....	63
<b>Tabela 5.8</b>	Frações granulométricas do agregado miúdo para o método das barras (NBR 9783 , 1987; ASTM C1260, 1994).....	65
<b>Tabela 5.9</b>	Percentual de óxido de cálcio livre em função da profundidade da pilha de estocagem de escória (GUPTA et al., 1995).....	69

<b>Tabela 6.1</b>	Composição química das escórias de aciaria elétrica não beneficiada (EA1) e beneficiada (EA2) .....	77
<b>Tabela 6.2</b>	Caracterização química da escória de aciaria elétrica (EA3) .....	78
<b>Tabela 6.3</b>	Propriedades químicas e físicas do cimento .....	80
<b>Tabela 6.4</b>	Variação da abertura das agulhas no ensaio Le Chatelier (NBR 11582, 1991).....	80
<b>Tabela 6.5</b>	Expansibilidade da escória medida através do método autoclave .....	81
<b>Tabela 6.6</b>	Expansibilidade da escória (EA3) medida através do método de ensaio preconizado pela norma JIS A 5015 .....	83
<b>Tabela 6.7</b>	Resultados e limites máximos admissíveis do ensaio de lixiviação da escória beneficiada (EA3).....	84
<b>Tabela 6.8</b>	Resultados e limites máximos admissíveis do ensaio de solubilização da escória beneficiada (EA3).....	84
<b>Tabela 6.9</b>	Composição química do cadinho utilizado nas fusões da escória.....	86
<b>Tabela 6.10</b>	Caracterização química das escórias granuladas .....	89
<b>Tabela 6.11</b>	Índices de hidraulicidade da escória ACIGRAN .....	92
<b>Tabela 6.12</b>	Resultados da expansibilidade da escória de aciaria granulada avaliada por distintos ensaios.....	
<b>Tabela 6.13</b>	– Resultados e limites máximos admissíveis do ensaio de lixiviação da ACIGRAN (EA3-G).....	
<b>Tabela 6.14</b>	Resultados e limites máximo admissíveis do ensaio de solubilização da escória ACIGRAN (EA3-G).....	95
<b>Tabela 6.15</b>	Índice de atividade pozolânica da escória de aciaria granulada com cimento.....	97
<b>Tabela 6.16</b>	Composição química das escórias, antes e após o processo de granulação.....	100
<b>Tabela 6.17</b>	Composição química de escórias de aciaria e alto-forno granuladas.....	102
<b>Tabela 6.18</b>	Massas Específicas (NBR 9776, 1987) das escórias.....	103
<b>Tabela 6.19</b>	Resultados da expansibilidade da escória de aciaria granulada avaliada por distintos ensaios.....	
<b>Tabela 6.20</b>	Índice de atividade pozolânica da escória de aciaria granulada com cimento.....	104
<b>Tabela 7.1</b>	Composição química da escória de alto-forno (EAF-G).....	108
<b>Tabela 7.2</b>	Quantidade de materiais necessária para moldagem de argamassas com ACIGRAN e escória de alto-forno (EAF-G), traço 1: 1,5 .....	109
<b>Tabela 7.3</b>	Quantidade de materiais necessária para moldagem de argamassas com ACIGRAN e escória de alto-forno (EAF-G), traço 1: 3,0 .....	110
<b>Tabela 7.4</b>	Quantidade de materiais necessária para moldagem de argamassas com ACIGRAN e escória de alto-forno (EAF-G), traço 1: 4,5 .....	110
<b>Tabela 7.5</b>	Resultados de resistência à compressão de argamassas com ACIGRAN de traço 1: 1,5 aos 7 (fc <sub>7</sub> ), 28 (fc <sub>28</sub> ) e 91 (fc <sub>91</sub> ) dias .....	112
<b>Tabela 7.6</b>	Resultados de resistência à compressão de argamassas com ACIGRAN de traço 1: 3,0 aos 7 (fc <sub>7</sub> ), 28 (fc <sub>28</sub> ) e 91 (fc <sub>91</sub> ) dias .....	113
<b>Tabela 7.7</b>	Resultados de resistência à compressão de argamassas com ACIGRAN de traço 1: 4,5 aos 7 (fc <sub>7</sub> ), 28 (fc <sub>28</sub> ) e 91 (fc <sub>91</sub> ) dias .....	114



<b>Tabela 7.8</b>	Resultados de resistência à compressão de argamassas traço 1: 1,5 com escória de alto-forno (EAF-G).....	115
<b>Tabela 7.9</b>	Resultados de resistência à compressão de argamassas de traço 1: 3,0 com escória de alto-forno (EAF-G).....	115
<b>Tabela 7.10</b>	Resultados de resistência à compressão de argamassas de traço 1: 4,5 com escória de alto-forno (EAF-G).....	116
<b>Tabela 7.11</b>	Análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, traço e teor na resistência à compressão de argamassas com ACIGRAN .....	117
<b>Tabela 7.12</b>	Hidróxido de cálcio ao longo do tempo em pastas com distintos teores de ACIGRAN ....	127
<b>Tabela 7.13</b>	Valor do pH em função da idade .....	127
<b>Tabela 7.14</b>	Análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de ACIGRAN no consumo de hidróxido de cálcio.....	127
<b>Tabela 7.15</b>	Análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de ACIGRAN no pH .....	128
<b>Tabela 7.16</b>	Valores de água não evaporável e sólidos hidratados em função do teor de substituição..	129
<b>Tabela 7.17</b>	Análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de substituição de ACIGRAN na quantidade de água não evaporável .....	130
<b>Tabela 7.18</b>	Análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de substituição de ACIGRAN nos sólidos hidratados .....	130
<b>Tabela 7.19</b>	Análise de variância (ANOVA) dos resultados da resistência à compressão de argamassas com ACIGRAN e alto-forno.....	132
<b>Tabela 7.20</b>	Resultados e limites máximos admissíveis do ensaio de lixiviação das argamassas sem e com escórias .....	136
<b>Tabela 7.21</b>	Resultados e limites máximos admissíveis do ensaio de solubilização das argamassas sem e com escória ACIGRAN.....	137
<b>Tabela 7.22</b>	Taxas de absorção e resistências capilares de argamassas com ACIGRAN .....	143
<b>Tabela 7.23</b>	Resultados da análise estatística através da ANOVA da taxa de absorção por sucção capilar das argamassas com ACIGRAN .....	144
<b>Tabela 7.24</b>	Resultados da análise estatística através da ANOVA da resistência capilar das argamassas com ACIGRAN.....	144
<b>Tabela 7.25</b>	Absorção por imersão e índice de vazios (NBR 9878, 1990).....	148
<b>Tabela 7.26</b>	Resultados da análise estatística através da ANOVA da absorção por imersão das argamassas com ACIGRAN.....	149
<b>Tabela 7.27</b>	Resultados da análise estatística através da ANOVA do índice de vazios após imersão das argamassas com ACIGRAN.....	152
<b>Tabela 7.28</b>	Coefficientes de difusão de argamassas com adição ACIGRAN.....	157
<b>Tabela 7.29</b>	Resultados da análise estatística através de análise de variância (ANOVA) do coeficiente de difusão.....	158
<b>Tabela 7.30</b>	Espessura de carbonatação nas distintas idades e traços .....	174
<b>Tabela 7.31</b>	Resultados da análise estatística (ANOVA) da profundidade de carbonatação .....	179
<b>Tabela 7.32</b>	Resistência à tração na flexão de corpos-de-prova submersos em solução 5 % de NaSO <sub>4</sub> e água com cal .....	187
<b>Tabela 7.33</b>	Análise estatística através do ANOVA dos resultados da resistência à tração na flexão de argamassas submetidas ao ataque por sulfato .....	188
<b>Tabela 7.34</b>	Índice de resistência química de argamassas com escórias ACIGRAN.....	191



**Tabela 7.35** Análise estatística através do ANOVA do índice de resistência química das argamassas.192

## RESUMO

A reciclagem de resíduos tem sido considerada uma alternativa bastante adequada na busca da conservação ambiental e do desenvolvimento sustentável. Isto porque, entre outros benefícios, tem-se a substituição de matérias-primas não renováveis, possibilidade de diminuição do elevado consumo energético e do dióxido de carbono gerado na fabricação de materiais tradicionais. Escórias de aciaria elétrica são resíduos da fabricação do aço geradas em grande quantidade e que, na sua maioria, são dispostas em áreas abertas sem um destino final. A pavimentação de rodovias é um dos poucos usos dados a esta escória, isto porque a mesma apresenta um caráter expansivo, que pode vir a comprometer a durabilidade dos materiais que a incorporar. Este trabalho tem como objetivo propor um método para a estabilização quanto à expansibilidade das escórias de aciaria elétrica e estudar o desempenho mecânico e de durabilidade desta escória tratada em argamassas. O método de estabilização proposto foi o de resfriamento brusco, o qual proporcionou a transformação da estrutura cristalina da escória para amorfa, que em conjunto com a sua composição química, favoreceu o aparecimento de propriedades hidráulicas. Foram estudadas argamassas de traços 1: 1,5, 1:3,0 e 1: 4,5 com substituição de 0, 10, 30, 50 % de cimento por escória de aciaria resfriada bruscamente (ACIGRAN). Do ponto de vista de resistência à compressão, o desempenho apresentado pelas argamassas com a ACIGRAN foi o mesmo que as sem, independente do teor utilizado. Quanto aos aspectos de durabilidade, as escórias foram avaliadas nos mesmos traços e teores de ACIGRAN descritos acima, do ponto de vista de absorção de água, resistência ao ataque de íons cloretos, carbonatação e resistência ao ataque por sulfato. Com exceção da carbonatação, a incorporação da escória ACIGRAN apresentou desempenho igual ou superior quando comparada a argamassas sem escória, sendo que o teor ótimo variou de acordo com a propriedade analisada.

## ABSTRACT

Electric steel slag is a residue generated in large amount during steel production process, being dumped in open areas without a productive use. The expansive characteristics of the slag can be dangerous to any material that uses it as an admixture, and its use is almost restricted to non confined pavement bases in roads. This work proposes a method for expansion stabilization of electric steel slag and studies the mechanical and durability performance of the resulting slag in mortars. The stabilization method proposed is the fast cooling of the slag when it is carried out from the electric arc furnace, transforming its crystalline structure into amorphous, which, together with its chemical composition, lead to hydraulic properties. The mortar proportions studied were 1:1,5, 1:3,0 and 1:4,5 with substitution of 0, 10, 30 and 50% of cement for fast cooled electric steel slag (ACIGRAN). The compression test results of these mortars were identical to that of specimens without ACIGRAN admixtures. Except for carbonation test, all other durability tests (water absorption, chloride ions attack, sulfur attack) presented the same or better results when compared to specimens without slag.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 RESÍDUOS, PRESERVAÇÃO AMBIENTAL E CONSTRUÇÃO CIVIL

A importância das questões relativas à conservação ambiental nos segmentos da atividade econômica e políticas governamentais vem crescendo significativamente a partir desta última década.

Demanda por energia e recursos naturais atingindo níveis cada vez maiores, associado a rápida evolução da tecnologia faz com que mais facilmente se intervenha na natureza, favorecendo uma intensificação da exploração de recursos naturais esgotáveis.

As empresas vêm sofrendo tanto pressões formais por parte das legislações ambientais como por parte da sociedade e do mercado de uma forma geral. Isto vem fazendo que uma atenção especial aos aspectos ambientais seja dada para a manutenção da aceitabilidade das empresas ou de um setor, tanto em âmbito regional, nacional como internacional.

A principal fonte de degradação ambiental é a geração de resíduos. Dois são os caminhos para minimizar os danos gerados pelos resíduos: minimizar sua geração e reutilizá-los ou reciclá-los. A redução do volume gerado está associado muitas vezes a limites técnico-operacionais difíceis de serem vencidos (SILVA et al., 1997), além do que pode resultar em um impacto ambiental maior do que o benefício obtido (JOHN, 2000). Já a reciclagem, uma vez comprovado que o material não possua periculosidade, pode ser um vasto campo de aplicação, com retorno financeiro.

Resíduos são todos os rejeitos gerados dentro do processo de produção ou consumo de um outro produto, independente do seu valor comercial (JOHN, 1996). Segundo JOHN (1997), do ponto de vista ambiental, o principal objetivo é transformar um resíduo em um subproduto<sup>1</sup>, uma vez que através da reciclagem é possível reduzir o consumo energético na produção de novos produtos, além de favorecer a dispersão de compostos contaminantes, o que não ocorre quando da deposição dos resíduos, onde há o favorecimento de concentração de produtos.

Maior atenção tem sido dada à reciclagem dos resíduos industriais nestes últimos anos. Pode-se atribuir este fato tanto a aspectos econômicos quanto ambientais. Cita-se as receitas adicionais geradas e a redução de custos, uma vez que não há mais necessidade de grandes áreas de armazenamento, além da possibilidade do valor agregado pelo seu uso. Neste último aspecto, a reciclagem se enquadra dentro do programa ZERI – “Zero Emission Research Initiative”, da Universidade das Nações Unidas e Fundação Zeri, de Genebra. Uma das definições principais é o de valor agregado. Na emissão zero nenhum

---

<sup>1</sup> Subproduto é quando um resíduo adquire valor comercial (CINCOTTO, 1988)



resíduo, seja sólido, líquido ou gasoso, deve ser gerado. Quando ocorrer, este resíduo deve ser utilizado por outras indústrias na criação de valor agregado, pois é ele que move a economia e garante o fluxo de recurso sustentável (NUNES, 1998).

Acrescenta-se ainda que as práticas legais de descarte estão cada vez mais restritivas.

A regulamentação 91/156/EEC estabelece que os países membros da C.E.E. (Comunidade Econômica Européia) devem traçar estratégias para reduzir a geração de resíduos, reciclar e reutilizá-los como materiais secundários e empregá-los ou convertê-los sem causar danos à saúde humana e ao meio ambiente (VASQUEZ, 1997).

Os primeiros aspectos normativos relacionados às questões ambientais eram basicamente abordados no campo da regulamentação técnica, ou seja, eram fixados valores limites que deveriam ser respeitados. Para atender estas exigências, as indústrias instalaram equipamentos para controle de poluição, que apesar do alto custo, foram insuficiente para resolver o problema de degradação do meio ambiente (BRILHANTE, 1998).

A partir de 1991 começaram a ser elaboradas normas de sistemas de Gestão Ambiental. A primeira com esta visão foi a norma britânica BS 5750, seguida em 1993 por vários outros países como na França (AFNOR), Espanha (AENOR), Irlanda (NSAI), Holanda (NNI) e África do Sul (SABS)(ABNT, 1994). A mais recente normalização ambiental, aprovada em 1996, está consolidada na família de normas ISO 14000.

Em 1992, o encontro mundial realizado no Rio de Janeiro, ECO92, resultou em um documento denominado Agenda 21, onde quatro capítulos são destinados a resíduos sólidos, referindo-se ao manejo ecologicamente e ambientalmente saudável. (TEIXEIRA, 2000).

Encontra-se em tramitação no Congresso Nacional brasileiro, um projeto de lei nº 3029/97 (que institui uma Política Nacional de Resíduos – SISNARES) que disciplinará os tratamentos e as disposições finais dos resíduos domésticos e hospitalares (TEIXEIRA, 2000).

Outra preocupação que surgiu na década de 90, é o chamado Desenvolvimento Sustentável, definido em 1987, pelo "*Brundtland Commission*" da Organização das Nações Unidas, como sendo o desenvolvimento que atende as necessidades de hoje sem comprometer a capacidade de possíveis gerações futuras de atender suas próprias necessidades (BOURDEAU, 2000).

Atualmente, o impacto ambiental causado pela indústria da Construção civil é bastante elevado. Segundo BOURDEAU (2000), na União Européia, as construções são responsáveis por mais de 40 % do total de energia consumida e por aproximadamente 40% de todo lixo gerado pelos homens.

MEHTA (1999) apresenta números que corroboram os apresentados por BOURDEAU (2000) para verificar os danos gerados pela indústria da construção mundialmente. Segundo o autor, as atividades da construção consomem 40% da pedra extraída, 25% da madeira virgem, 40% do total de energia e 16% da água.

Para os engenheiros civis, um desafio em um futuro próximo, será realizar projetos em harmonia com o conceito de desenvolvimento sustentável, que envolve o uso de materiais de alto desempenho produzidos a custos baixos e com menor impacto ambiental possível (BILODEAU e MALHOTRA, 2000).

Uma alternativa para minimizar o impacto ambiental e buscar o desenvolvimento sustentável é a reciclagem de resíduos. Além do dano ambiental, a construção civil é um setor promissor para a reciclagem de resíduos por uma série de fatores. Em primeiro lugar, o déficit habitacional existente no país é bastante elevado e o custo dos materiais tradicionais é alto para que possam ser empregados por uma grande parcela da população. Normalmente estes custos elevados estão relacionados com alto consumo energético. Em segundo lugar, um aumento de produção de edificações poderia levar à escassez de alguns insumos, além de um provável aumento de preço dos mesmos. E por último, pode-se citar as melhorias proporcionadas pela adição de alguns resíduos agrícolas e industriais, tanto do ponto de vista de propriedades mecânicas quanto de durabilidade, aos materiais tradicionais de construção. Do ponto de vista econômico, a viabilidade está vinculada à quantidade disponível do resíduo; neste aspecto destaca-se a indústria siderúrgica que, apesar de vir dedicando cada vez mais investimento e tempo em equipamentos e formação de quadros técnicos capazes de solucionar os problemas de ordem ambiental, continua gerando uma grande quantidade de resíduos.

Dentre estes resíduos, pode-se destacar as escórias de aciaria geradas na produção do aço, que além da problemática da elevada geração, apresentam um caráter expansivo, o que faz que, para grande parte destas não se tenha uma utilização, sendo armazenada em áreas abertas, ou quando usadas sem um mínimo controle de qualidade, são as responsáveis pelo surgimento de manifestações patológicas nos materiais em que foram incorporadas.

Desta forma, a parceria destas duas grandes indústrias, da Construção civil e Siderúrgica, é um grande passo a caminho do Desenvolvimento Sustentável.

## **1.2 OBJETIVOS**

O presente trabalho tem como objetivo testar um método de estabilização da escória de aciaria elétrica quanto à expansibilidade e avaliar a viabilidade técnica do uso da escória tratada como substituição ao cimento.

A escória estabilizada é denominada ao longo do trabalho de "ACIGRAN".



Como objetivos específicos têm-se:

- caracterizar uma escória recém gerada em uma aciaria elétrica do ponto de vista químico, físico, mineralógico e ambiental, com vistas a identificar as alterações ocorridas na escória decorrente do processo de estabilização;
- caracterizar a escória estabilizada (*ACIGRAN*) do ponto de vista químico, físico, mineralógico e ambiental;
- testar se o processo de granulação é válido para uma escória de aciaria elétrica gerada por outra usina;
- avaliar o desempenho de argamassas com escória estabilizada (*ACIGRAN*), do ponto de vista:
  - mecânico;
  - de absorção de água;
  - de difusão de cloretos;
  - de carbonatação;
  - de resistência ao sulfato.
- avaliar se as argamassas com *ACIGRAN* apresentam comportamento similar às argamassas com escória de alto-forno do ponto de vista mecânico.

### 1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente trabalho está estruturado em 9 capítulos, nos quais podem ser identificadas duas grandes partes, seguidas das considerações finais e sugestões para próximos trabalhos. Na primeira, constituída dos capítulos de 1 a 5, além de mostrar um panorama geral da geração das escórias de aciaria e o uso que vêm sendo dado às mesmas, introduz a problemática da expansão das escórias, como quantificá-la e sobretudo, como saná-la.

Na segunda parte são apresentados e discutidos resultados referentes ao processo empregado de estabilização da escória - resfriamento brusco, e à utilização da escória estabilizada como substituição ao cimento em argamassas.

E por último são apresentadas as conclusões e sugestões para próximos trabalhos.

Os capítulos estão distribuídos conforme descrito a seguir.

No capítulo 1 é apresentada a importância da reciclagem de resíduos e a posição da indústria da construção civil e da siderúrgica dentro do contexto do desenvolvimento sustentável. No segundo capítulo são mostrados os principais processos de produção do aço, com as respectivas gerações e beneficiamento das escórias.

Considerações sobre a utilização dada a estes materiais, assim como as implicações de seu uso são apresentados no capítulo 3.

No capítulo 4 são apresentadas características químico-físico-mineralógicas das escórias e abordados aspectos teóricos referentes à hidratação e reatividade das escórias de alto-forno, os quais podem ser estendidos para o entendimento do comportamento das escórias ACIGRAN.

No capítulo 5 são abordadas as causas do problema de expansibilidade das escórias, bem como as diferentes maneiras de quantificá-las e propostas para solucionar este problema.

O programa experimental é descrito nos capítulos 6 e 7. No capítulo 6 são abordados aspectos referentes à estabilização da escória em laboratório. E no capítulo 7 são apresentados e discutidos resultados da avaliação de algumas propriedades das argamassas com incorporação da escória estabilizada (ACIGRAN).

E por último, no capítulo 8, encontram-se as conclusões e no 9 as recomendações para futuros trabalhos.

#### **1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA**

Em virtude da quantidade total de material obtido através do processo de granulação em laboratório ser pequena, a pesquisa apresenta algumas limitações, quais sejam:

- O desempenho mecânico foi avaliado apenas em termos da resistência à compressão;
- os ensaios foram realizados em argamassas e não em concretos, não sendo avaliada a influência da escória na zona de transição (agregado graúdo/pasta);
- a avaliação dos produtos de hidratação para explicar a variação da resistência mecânica foi realizada apenas para uma idade;

Por limitações técnicas do laboratório, não se conseguiu desenvolver o aparato para avaliação da expansão da escória através da ação do vapor em tempo hábil para realização dos ensaios nas escórias em estudo.

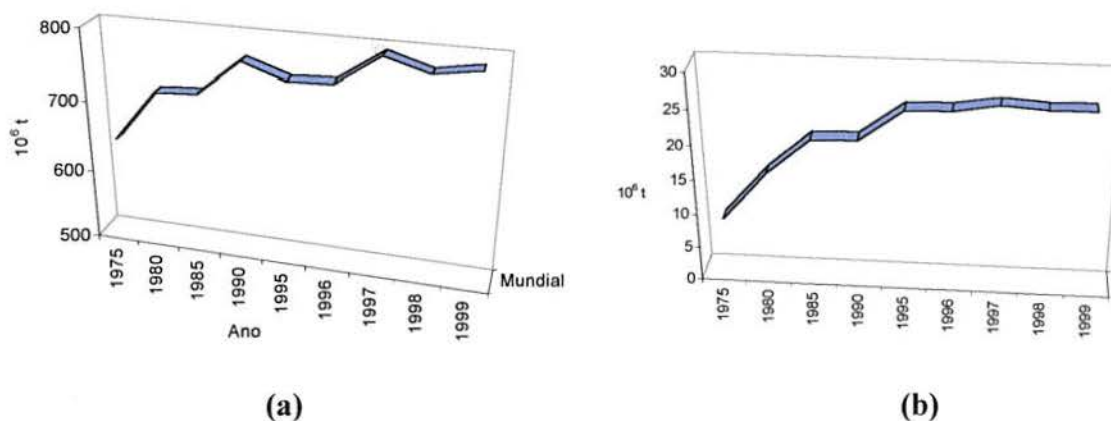


## 2 PRODUÇÃO DO AÇO - GERAÇÃO E BENEFICIAMENTO DAS ESCÓRIAS

A indústria siderúrgica se sobressai no que se refere à elevada produção de materiais a base de ferro. Associado a esta posição, tem-se a alta geração de resíduos.

O montante de resíduos gerados por uma usina siderúrgica integrada<sup>1</sup> a coque se situa em torno de 700 kg/t de aço líquido (PEREIRA, 1994). Considerando a produção mundial, estima-se a geração anual de resíduos em torno de 551 milhões de toneladas. Este número se torna mais significativo se for levado em consideração que, apenas nestas duas últimas décadas, houve um aumento de 100 milhões de toneladas de aço em nível mundial, e 10 milhões de toneladas de aço em nível nacional, representando aproximadamente um aumento de 15 e 66%, respectivamente, conforme dados do IBS (1997), IBS (2000) e ILAFA (1995) e como pode ser visualizado nas figura 2.1 (a) e (b).

Do processo siderúrgico, as escórias são os resíduos de maior geração (CHEHEBE et al, 1986). Estima-se que sua geração situa-se entre 70 a 170 kg/t (PEREIRA, 1994).



**Figura 2.1** Evolução anual da produção do aço (a) mundial (b) nacional

Fonte: IBS(1997), IBS(2000) e ILAFA(1995)

A geração das escórias pode se dar tanto na fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro-gusa, como na etapa subsequente, na produção do aço, resultando nas escórias chamadas de alto-forno e de aciaria, respectivamente.

Com o uso de distintas tecnologias para a produção de aço, escórias de aciaria de diferentes características são geradas, de forma que, para entender o comportamento destas, se faz necessário o conhecimento dos processos de fabricação do aço.

<sup>1</sup> Usina siderúrgica integrada é toda aquela que, em uma mesma usina, reúne a produção de ferro primário, aço e um ou mais processos de conformação mecânica.

A figura 2.2 mostra, simplificada, os principais processos de produção do aço e as respectivas etapas de geração de escórias.



\* : Neste processo a matéria-prima é preponderantemente sucata de aço

\*\* : Neste processo a matéria-prima é preponderantemente gusa líquido

**Figura 2.2** Representação esquemática da produção do ferro-gusa e processos de produção do aço, com suas respectivas etapas de geração de escórias

Os dois principais métodos de produção do aço são: através da fusão e refino da sucata em fornos elétricos a arco; e através do refino do gusa líquido em conversores a oxigênio (SANO et al., 1997). O primeiro é produzido normalmente a partir de uma carga sólida, enquanto o segundo a partir de uma carga líquida, precedida de um carregamento de sucata. Os respectivos processos de fabricação são designados pelo tipo de equipamento, ou seja, forno elétrico a arco (FEA) e conversor LD (e suas variações).

Os fornos elétricos a arco (FEA) vêm sendo utilizados para produção, principalmente, de produtos longos, como por exemplo vergalhões para a Construção Civil e barras e perfis para a indústria metal mecânica. Os conversores a oxigênio (LD ou BOF)<sup>2</sup> são tipicamente

<sup>2</sup> LD: Denominação dos conversores a oxigênio, em homenagem às usinas de Linz e Donawitz, localizadas na Áustria, por serem as primeiras nas quais este tipo de processo foi instalado;  
BOF: “Basic Oxygen Furnace”. Denominação também usada para os conversores a oxigênio.



empregados para produção de grandes quantidades de aço, destacando-se na produção de produtos planos, como por exemplo chapas para a indústria automobilística.

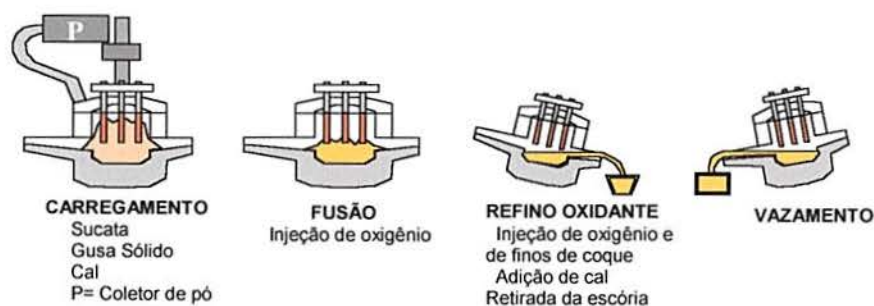
Da mesma forma que os fornos, as escórias de aciaria são classificadas basicamente em escória de forno elétrico, formada quando da transformação de sucata metálica em aço num forno elétrico a arco e escória de conversor, formada quando da transformação do ferro-gusa (líquido) em aço (JIS A 5015 / 1992).

As operações de carregamento, fusão, refino oxidante e de vazamento no FEA estão, esquematicamente, representadas na figura 2.3.

A escória de FEA, também conhecido por forno elétrico de fusão, é chamada de escória de refino oxidante. Esta escória é produzida durante a fusão da carga sólida, com a cal adicionada e pela descarburização com oxigênio do aço no estado líquido, que provoca a oxidação de diversos elementos do banho.

O aço líquido possui uma densidade duas vezes maior que a escória líquida. A escória, sendo mais leve, flutua na superfície do aço líquido a aproximadamente 1650° C. No final do processo de fusão, o forno é basculado (figura 2.3) e a escória líquida escorre para um leito de escória, no qual solidifica.

O aço líquido vazado do forno de fusão é conduzido para uma estação de refino secundário, que pode ser um forno-panela. Há a formação de uma nova escória, a partir da adição de desoxidantes e de cal - chamada de escória de refino redutor - que tem como objetivo a eliminação do oxigênio e do enxofre do aço líquido e o ajuste da composição do aço, pela adição de ferro-ligas.



**Figura 2.3** Representação esquemática do processo de refino do aço através de forno elétrico a arco

Segundo LUXÁN et al. (2000) a escória oxidante é uma escória escura, densa e compacta, com teor de óxido de cálcio inferior a 40% e microscopicamente pode ser observado na sua superfície pequenas partículas de ferro. Já as escórias redutoras apresentam um teor de CaO superior a 40 % e apresenta alta porosidade.

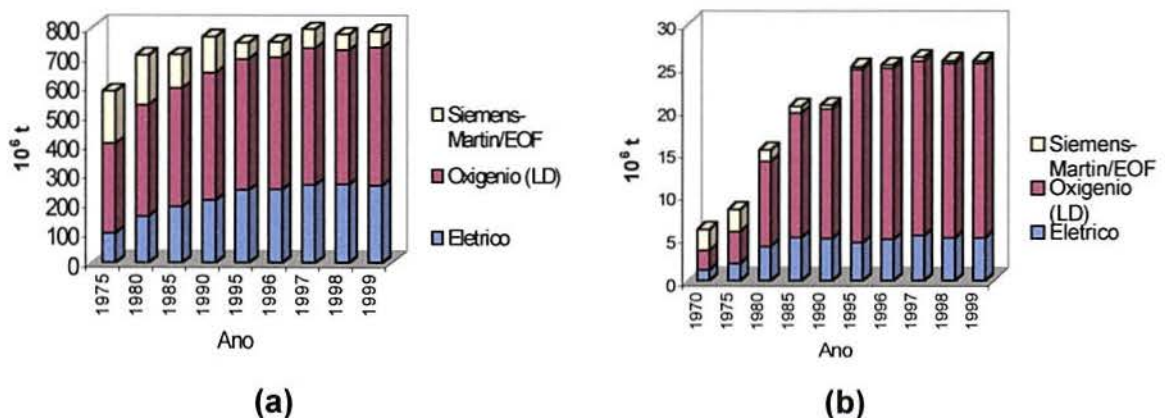
A figura 2.4 mostra esquematicamente a seqüência do refino do aço em um conversor LD (MOORE e MARSHALL, 1991).

No processo LD o gusa líquido, a sucata metálica e o fundente (CaO) são carregados no conversor. O oxigênio soprado a alta pressão provoca uma violenta reação de oxidação, fazendo com que as temperaturas locais sejam na ordem de 2500 a 3000 °C. Parte do silício, fósforo e ferro do gusa líquido se oxida, os quais combinando com CaO, formam a escória de conversor LD. O aço líquido e a escória separam-se pela diferença de massa específica e são vazados do conversor, separadamente (LOUZADA, 1995).



**Figura 2.4** Processo de refino do aço através de conversor LD ( MOORE e MARSHALL, 1991)

A maior parte da produção de aço, segundo dados do IBS (1997), IBS (2000) e ILAFA (1995), é feita através do processo de sopro por oxigênio LD, seguido pelo processo com forno elétrico, como pode ser visto na figura 2.5 (a) e (b). Nas mesmas figuras observa-se ainda a participação dos processos chamados de Siemens-Martin, não existente no Brasil e quase em desuso atualmente e o EOF (Energy Otimization Furnace), que é utilizado no Brasil, em uma única usina.



**Figura 2.5** Produção de aço bruto por processo (a) mundial (b) nacional  
Fonte: IBS(1997), IBS(2000) e ILAFA(1995) mundial



A região sul do Brasil é responsável por 3,2 % da produção brasileira de aço, dos quais 2,3 % no Rio Grande do Sul (IBS, 2000). As siderúrgicas situadas no estado do Rio Grande do Sul são semi-integradas<sup>3</sup> e operam com aciarias elétricas. Considerando uma média de 130 kg/t de aço, tem-se uma geração anual de escória de aciaria elétrica de aproximadamente 74.750 toneladas. Com base nestes dados e com o objetivo de solucionar um problema regional, as escórias que serão analisadas ao longo deste trabalho são, portanto, escórias de aciaria elétrica.

## **2.1 TIPOS DE RESFRIAMENTO DAS ESCÓRIAS**

Existem três métodos de resfriamento da escória, gerando características físicas distintas: resfriamento ao ar, controlado com água e brusco com água ou ar. Dos três tipos, os mais empregados são o primeiro, para as escórias de aciaria e o último, para as escórias de alto forno.

### **2.1.1 Resfriamento ao ar**

A escória passa, lentamente, do estado líquido para o sólido sob condições atmosféricas. O processo pode ser acelerado através da molhagem com pequenos jatos de água. Este processo é o usualmente adotado para as escórias de aciaria.

A escória solidificada apresenta estrutura vesicular, textura superficial rugosa, maior superfície específica quando comparada com agregados mais lisos, favorecendo a aderência com material betuminoso e cimento (SLAG).

Posteriormente ao resfriamento, a escória sofre processo de beneficiamento através de britagem obtendo diferentes granulometrias, de acordo com o fim a que se destinam.

### **2.1.2 Resfriamento controlado com água**

O processo de resfriamento é acelerado através de quantidade controlada de água. Decorrente da ação da água e do vapor gerado, a escória incorpora ar e expande, apresentando uma estrutura alveolar e baixa massa específica (IAS, 1987), obtendo a chamada escória expandida. Apresenta maior porosidade e densidade que a escória resfriada ao ar. Na sequência, a escória é britada e separada em diferentes granulometrias. Normalmente, é utilizada como agregado leve.

Através do controle do processo de refrigeração podem ser formadas pelotas cristalinas, as quais são consideradas como agregados.

---

<sup>3</sup> Siderúrgicas semi-integradas operam apenas na etapa de refino e conformação do aço, não na produção de ferro primário.

### **2.1.3 Resfriamento brusco com água ou ar**

Este processo se dá através de água ou ar. O primeiro, o mais largamente utilizado, é feito através de jatos com grande quantidade de água sob alta pressão sobre a escória líquida para evitar a recristalização da fase vítrea e a precipitação de fases cristalinas, tais como mervinita. Para tanto, necessita-se de  $10 \text{ m}^3 / \text{t}$  para o processo estático e menos que a metade para o processo dinâmico (GHOSH, 1982). A escória gerada é de pequena dimensão e sua estrutura é amorfa, uma vez que não há tempo para formação de cristais (SLAG). Estas escórias apresentam alta hidraulicidade, endurecendo quando em contato com um determinado reagente, como por exemplo calcário, ou na presença de água (JACOMINO et al., 2000).

## **2.2 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DA ESCÓRIA NA INDÚSTRIA**

Um exemplo de ciclo de beneficiamento, desde a escória sendo vertida em sua baia, na siderúrgica, até seu resfriamento, processamento e estocagem, pode ser visto na sequência de fotografias, apresentadas nas figuras 2.6 e 2.7.

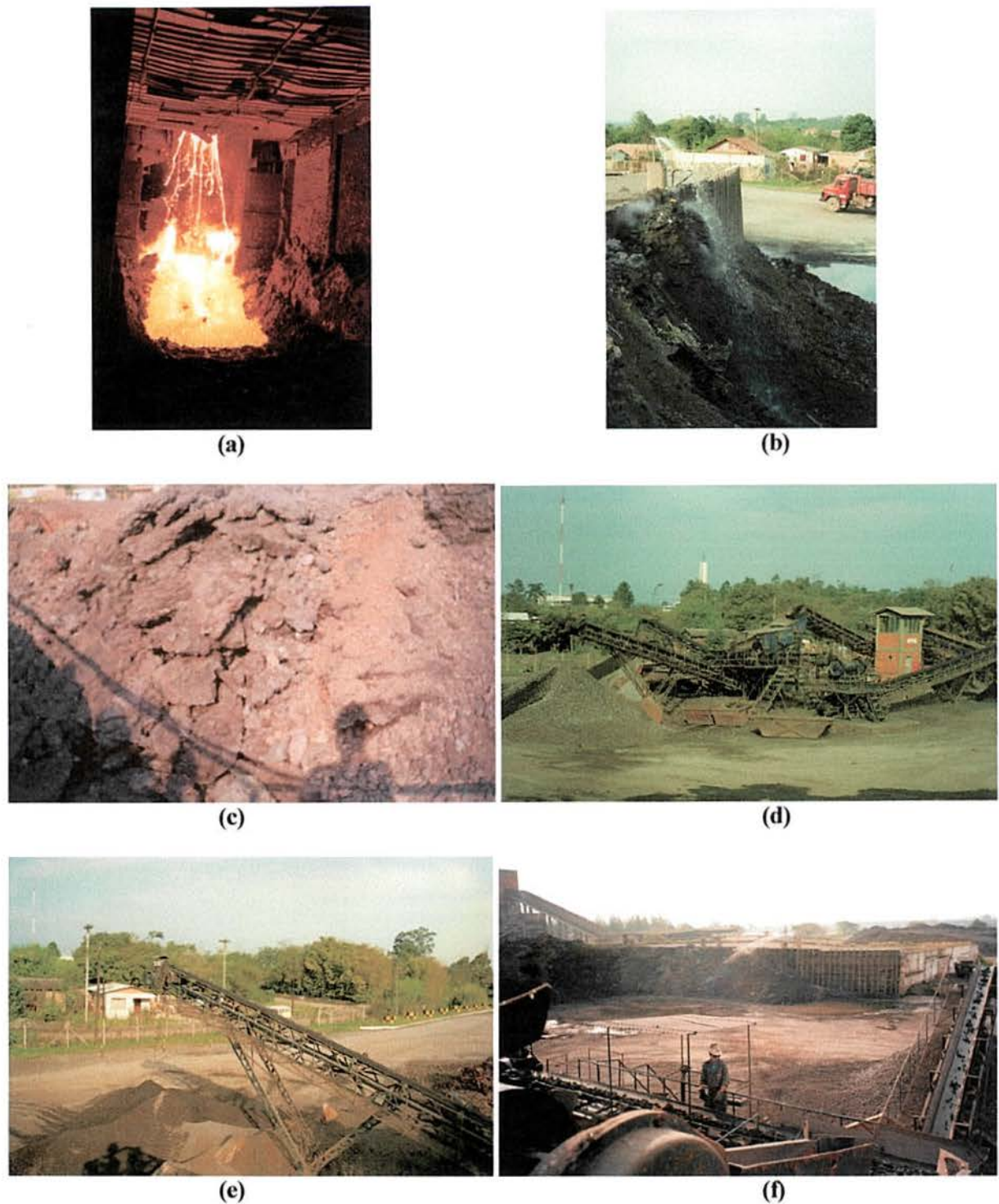
A escória permanece na baia onde é vertida (figura 2.6(a)), tempo suficiente para solidificar-se e poder ser transportada em caminhão tipo escavadeira, e levada para uma área onde é feito o seu completo resfriamento. Nesta região são colocadas tanto as escórias oxidantes como as redutoras. As escórias são depositadas em local dotado de dispositivos aspersores de água, os quais auxiliam no resfriamento da escória (figura 2.6(b)). No caso de nem toda a escória ficar exposta à água, pode ocorrer a formação de placas de grandes dimensões, como pode ser visualizado na figura 2.6(c). O tratamento de resfriamento dado varia de 48 a 72 horas.

Após decorrido o tempo de resfriamento, inicia-se o processo de beneficiamento das escórias, através da britagem. O sistema é composto por um ciclo fechado de um eletroimã, correias transportadoras e britadores. A figura 2.6(d) mostra uma vista geral da planta de britagem das escórias. Inicialmente a escória passa por uma correia composta por um eletroimã (figura 2.6(f)), com a finalidade de recuperar a maior parte possível da fração de fase metálica ainda presente nas escórias. O ferro captado pelo eletroimã é transportado através de uma esteira até um britador e armazenado separadamente para posterior reutilização na aciaria da siderúrgica, sendo chamada de sucata recuperada.

Por uma questão de processo, as escórias redutoras precisam, no caso de serem britadas, ser misturadas com a escória oxidante, uma vez que desagregam-se com muita facilidade, acarretando problemas no momento da britagem. A proporção aproximada da mistura das escórias é de 90 % de escória oxidante e 10 % de escória redutora, conforme



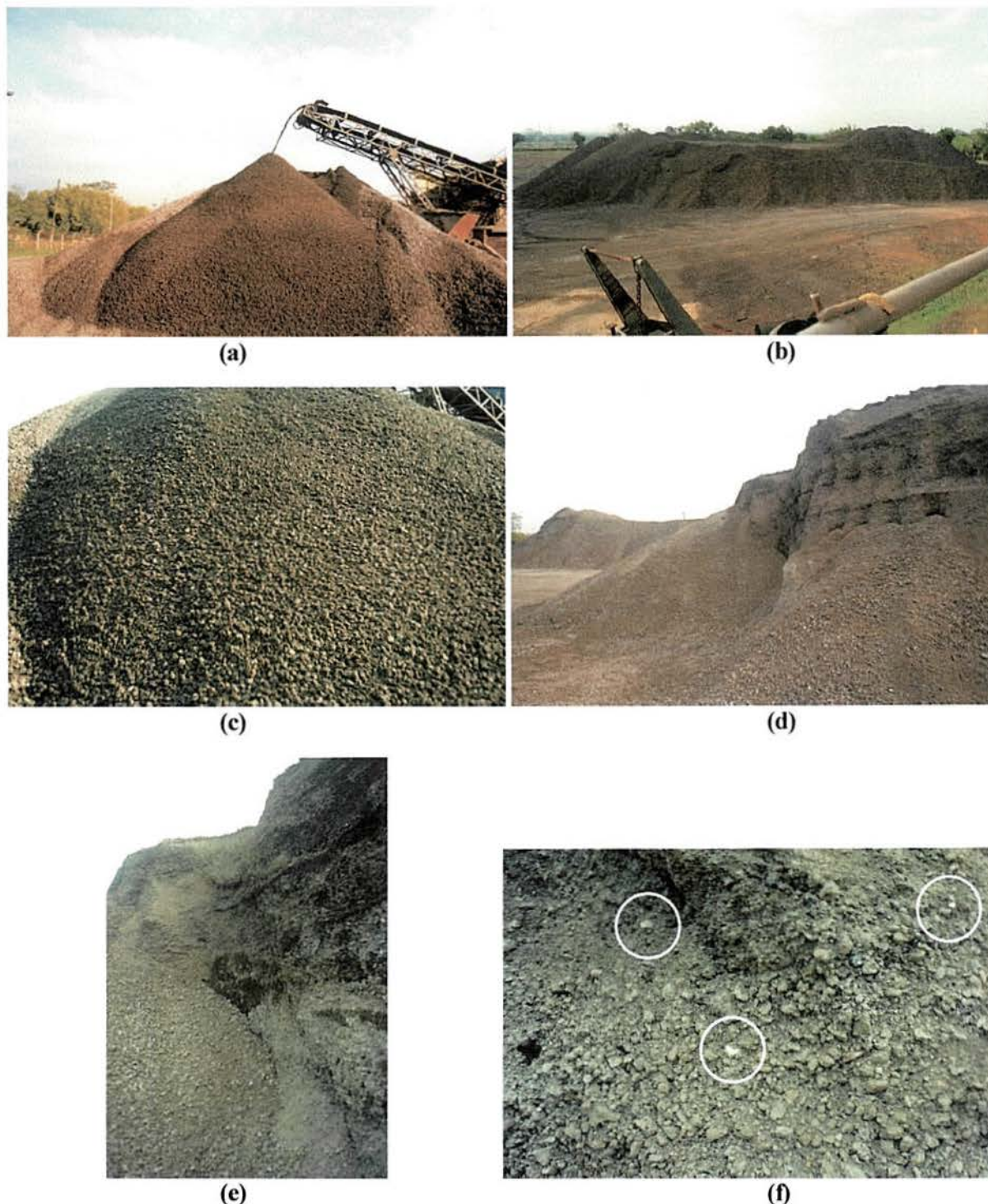
dados da empresa beneficiadora.



**Figura 2.6** (a) Escória sendo vertida na baia de escória na aciaria; (b) Área destinada ao resfriamento da escória recém vinda da aciaria, mostrando, em detalhe, o dispositivo aspersor de água usado para o resfriamento; (c) Aglutinação das partículas de escórias em placas de grandes dimensões por não terem recebido ação da água; (d) Vista geral da planta de beneficiamento; (e) Detalhe do ferro recuperado pelo eletroimã; (f) Detalhe da esteira (parte inferior da foto) que leva a escória que não atingiu a granulometria adequada para o início do processo. O funcionário acompanha ao lado para verificar se não restou algum pedaço de ferro de grande dimensão que possa ser retirado.



A escória britada é levada para área de armazenamento a céu aberto onde é deixada por um período mínimo de seis meses para ser curada<sup>4</sup> (figuras 2.7 (b) a (f)).



**Figura 2.7** (a) Detalhe da saída da escória do ciclo de britagem (b) Área de armazenamento da escória “verde”<sup>5</sup>; (c) Detalhe da escória verde; (d) Vista geral da escória estocada no pátio por um período superior a 12 meses, onde observa-se, no canto superior direito, que o material é mais coeso e sólido; (e) e (f) Detalhe da escória curada, com a presença de pontos brancos, onde evidencia-se a carbonatação do óxido de cálcio.

<sup>4</sup> Curada – Denominação dada à escória armazenada durante um determinado período de tempo e que aparentemente não apresenta mais problema de expansão.

<sup>5</sup> Escória recém saída do forno, que não sofreu processo de envelhecimento natural.



### **3 UTILIZAÇÕES DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA**

Os estudos referentes à utilização das escórias de aciaria começaram a ser realizados, segundo SUN et al. (1993), no início da década de 60 e difundidos a partir da década de 70, sendo que todos basicamente tratavam de escórias LD (ANDO, 1978; PIRET, 1978; LAKE, 1978). Anteriormente a estas datas alguns trabalhos foram desenvolvidos, porém com o enfoque metalúrgico ou de caracterização mineralógica (AGRELL, 1945; TREFFNER, 1965).

Com base em levantamento mundial feito por BOOM et al. (2000), em conferências sobre escórias, observa-se um aumento dos trabalhos sobre escória de aciaria, passando de 4,3% em 1992, para 5,9% em 1997 e 11,8% em 2000. Ao contrário das escórias de alto-forno, onde houve uma redução de 14,7 % para 4,8 %, de 1997 para 2000.

Esta tendência observada mundialmente, verifica-se também no Brasil. Alguns trabalhos foram desenvolvidos, na década de 80, concentrando-se basicamente na área de pavimentação (CHEHEBE, 1986; CSN, 1988; BURNIER, 1989). A partir da década de 90 houve um acréscimo de pesquisas em escórias de aciaria, elétrica e LD, tanto do ponto de vista de explicar o fenômeno de expansão quanto da viabilidade técnica do uso das escórias de aciaria em áreas alternativas à pavimentação.

Entre estes trabalhos destacam-se, dentro da construção civil, o da Universidade Fluminense/ Rio de Janeiro (LOUZADA, 1991), com o uso de escórias LD como agregado na fabricação de blocos pré-moldados; da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para escórias de aciaria elétrica, tanto oxidante como redutora, como escória de aço especial (inoxidável), escórias LD, para uso como adição e agregados para concretos, abordando também, a questão de impacto ambiental do produto desenvolvido (VILELA, 1998; MASUERO et al., 1998; GUMIERE, 1999; ZETTERMANN et al., 1999; GEYER, 2001; ROSA, 2001); da Universidade de São Paulo, para escórias LD, avaliando diferentes métodos para estimativa da expansão (MACHADO, 2000).

#### **3.1 USO EM PAVIMENTAÇÃO**

A aplicação de mais larga escala e difundida em vários países (PIRET e DRALANTS, 1984; CONTIJO 1989; PEREIRA, 1994; KRUGER, 1995; ROSTIK, 1999; SHI e QIAN, 2000) das escórias de aciaria é como agregado para pavimentação de rodovias, sendo utilizadas tanto como base e sub-base e como agregado para misturas asfálticas.

Apesar das escórias geradas em diferentes tipos de fornos apresentarem características e propriedades diferenciadas, alguns autores não fazem distinção ao se referirem às vantagens ou desvantagens do seu uso: GUTT (1972), BURNIER et al. (1988),

LOPEZ et al. (1989), ALI et al. (1992) e STEEL SLAG TECHICAL COMMITTEE (1996), citam que as escórias de aciaria, de uma forma geral, adequam-se para emprego em pavimentação devido uma série de propriedades, tais como: boa resistência ao desgaste, alta estabilidade, resistência mecânica, excelentes propriedades de atrito (resistência à derrapagem) e facilidade de compactação. FEATHERSTONE (1998) e KHAN et al. (1998) acrescentam ainda alta aderência ao asfalto e grande durabilidade.

Como consequência das propriedades das escórias, as camadas do pavimento podem ser mais finas, propiciando uma redução de custos decorrente da utilização de menos material (LITTLE, 1999).

O fato das escórias terem uma grande utilização em pavimentação é decorrente das excelentes propriedades físicas que possuem para esta aplicação, bem como do custo de comercialização, que, dependendo de onde empregado, é inferior ao dos agregados pétreos naturais convencionalmente utilizados. Segundo SOLOMON (1993) e SILVA et al. (2000), para a escória ser competitiva com a brita, a comercialização deve ser realizada em um raio econômico menor que aproximadamente 50 km. Desta forma, sua utilização em estradas vicinais ou em rodovias próximas onde as escórias são geradas, toma seu uso bastante atrativo.

O alto desempenho das escórias como agregado para misturas asfálticas tem sido verificado nos mais distintos climas, desde países de clima tropical, como Singapura, até os de clima frio, como Escandinávia (FEATHERSTONE, 1998).

Em estradas vicinais e estradas de acesso a fazendas, outro uso dado às escórias, são utilizadas em substituição ao saibro convencionalmente empregado, para combater a lama, por ocasião de estações chuvosas, com a vantagem de conferir grande estabilidade ao revestimento primário, pela sua alta massa específica (ABREU e CARNEIRO, 1994).

Na execução de base e sub-base, BURNIER et al. (1988) salientam que certos procedimentos básicos devem ser observados, quais sejam: compactação do material a fim de se obter um perfeito travamento das partículas; distribuição granulométrica do agregado entre materiais graúdo, miúdo e finos, a fim de possibilitar o fechamento da base e sub-base executada; saturação da escória, pela molhagem da mesma até sua rolagem, com vistas a provocar cimentação do agregado após a compactação; uso de escória de aciaria curada quando se tratar de bases confinadas.

A tabela 3.1 mostra as especificações recomendadas pelos mesmos autores para macadame hidráulico, pavimento este constituído de uma ou mais camadas de agregados siderúrgicos aglutinados pela água e compactados.



**Tabela 3.1** Faixas granulométricas de agregados siderúrgicos para uso em macadame hidráulico ( BURNIER et al., 1988)

Camada	Faixa granulométrica	
	polegadas	mm
1ª (Reforço)	2 ½" a 8"	6,35 a 20,32
2ª (Intermediária)	1 a 2"	2,54 a 6,35
3ª (Rolamento)	< ½"	< 1,27

Para camadas de pavimentos rodoviários, as normativas do D.N.E.R. (Departamento Nacional de Estrada de Rodagem), quanto à granulometria, especificam que a escória deve possuir 40% na faixa até 12,7 mm e 60% na faixa entre 12,7 a 50,8, além de atender a granulometria de projeto (DNER 262, 1994).

Em seu trabalho BURNIER et al. (1988) afirmam que "para bases confinadas a escória de aciaria deve estar curada". Esta citação diz respeito, provavelmente, ao problema de expansão apresentado pelas escórias. Em aplicações confinadas, ou seja, àquelas que vão servir de base e/ou sub-base para uma camada de concreto asfáltico ou mesmo para simplesmente uma base, a expansão da escória pode gerar sobrelevações e fissuração da camada superior. A mesma atenção também deve ser dada na utilização da escória na camada asfáltica.

Em 1991, o Ministério de Transporte de Ontário, Canadá, decretou por tempo indeterminado, moratória da utilização de escórias de aciaria e de alto-forno em misturas asfálticas à quente, decorrente do sucessivo aparecimento de manifestações patológicas e qualidade inferior dos agregados de escória de aciaria, usadas após o ano de 1980, quando comparadas aos agregados naturais. Foram observadas fissuras mapeadas, disposição de veios de cor cinza em volta das fissuras e empolamento do concreto asfáltico da superfície do pavimento. HELADI et al. (1996) indicam que a moratória foi estabelecida com objetivo da indústria siderúrgica melhorar o conhecimento sobre o comportamento da escória de aciaria como agregado e ser capaz de produzir um agregado com nível aceitável de qualidade para uso em asfalto quente (FARRAND and EMERY, 1994; STEEL SLAG TECHICAL COMMITTEE, 1996). Foram empregadas escórias tanto de aciaria elétrica como de conversor a oxigênio. Para o estudo do problema foi formada uma equipe com representantes das áreas envolvidas tais como, da indústria siderúrgica, do processamento da escória, de pavimentação, do Ministério dos Transportes e de consultores.

A causa atribuída para o aparecimento dos problemas detectados foi a hidratação retardada do óxido de cálcio e óxido de magnésio. Como resultado, a indústria fornecedora de agregados para pavimentação incorporou práticas para eliminar materiais deletérios e minimizar a quantidade de cal livre. Foi proposto um projeto de especificação e controle de qualidade das escórias para uso como agregados. Além disso, verificou-se a necessidade da realização de ensaios para avaliação da estabilidade volumétrica, através de ensaios em

imersão em água e ensaios de desempenho em corpos-de-prova de asfalto. Do ponto de vista da qualidade do agregado de escória e do asfalto com agregado de escória foram recomendados quatro ensaios (FARRAND and EMERY, 1994):

- Exame petrográfico: verificação da contaminação por partículas que não de escórias;
- Ensaio em autoclave: ensaio acelerado de 1 hora em autoclave, para verificar quanto de material é desagregado sob condições de alta temperatura e pressão;
- Expansão volumétrica: Ensaio de imersão de 7 dias para avaliar a expansão volumétrica
- Imersão de concreto asfáltico: Teste em corpos-de-prova Marshall para assegurar a estabilidade da massa asfáltica.

Após o estabelecimento da moratória, houve uma mudança de filosofia por parte dos geradores de escórias, deixando de tratar as escórias como resíduo deixado para deposição, sem o mínimo controle de qualidade.

Posteriormente, uma nova fase de estudo foi estabelecida, em Ontário, com o objetivo de desenvolver um sistema de gerenciamento de níveis de pavimentos, onde buscava-se, além de desenvolver um modelo de deterioração para pavimentos com escória, estabelecer critérios e estratégias de reabilitação de pavimentos com escórias para os 10 anos seguintes (HELALI et al., 1996).

ALI et al. (1992), embora concordem com as vantagens apresentadas por outros autores, citam uma série de desvantagens no uso da escória, quais sejam: acréscimo do consumo de asfalto e cimento, decorrente das características de sua alta absorvidade, textura superficial e angulosidade; alta variabilidade na composição química das escórias entre siderúrgicas e dentro de uma mesma siderúrgica; aumento de custos envolvidos com transporte, devido a uma alta massa específica; potencial expansivo natural superior a 10 %, atribuído à hidratação do óxido de cálcio livre e óxido de magnésio, quando em contato com umidade.

Apesar da série de aspectos negativos levantados, os mesmos autores estudaram oito misturas de concreto asfáltico, das quais cinco utilizaram escórias de aciaria elétrica e Siemens-Martin, variando-se a proporção de agregado graúdo e miúdo. Foi avaliado o comportamento quanto à resistência à tração, módulo de resiliência, fluência, fadiga e danos por umidade dos asfaltos confeccionados. Com base nos resultados obtidos, os autores afirmam que as escórias de aciaria são viáveis como agregado alternativo para misturas asfálticas, pois os concretos asfálticos confeccionados com escórias exibiram melhor qualidade do que os convencionalmente empregados na região de estudo, Canadá, em todas as propriedades estudadas.

KHAN et al. (1998) colocam que a rugosidade apontada por outros autores como vantagem, é um aspecto desfavorável. Segundo os autores, a alta rugosidade, associada à



alta massa específica e uma menor afinidade com asfalto, pode vir a gerar segregação, desgaste e problemas na hora da mistura.

Outro aspecto negativo da utilização da escória como agregado, tanto como base quanto como sub-base, segundo GUPTA et al. (1995), é a produção de tufa, descrito como sendo um depósito poroso de carbonato de cálcio, que acaba por obstruir os drenos da pavimentação, prejudicando o escoamento das águas pluviais.

Escórias de conversor a oxigênio têm maior potencial para formação de precipitados que escórias Siemens-Martins. As primeiras estão proibidas de serem empregadas como agregado para sub-base pelo Ohio e Department Transportation. Escórias Siemens-Martins, pelo fato de apresentarem uma quantidade inicial de óxido de cálcio livre menor e pelo histórico de serem estocadas por um longo período, podem ser utilizadas, com restrições. As escórias de alto-forno, que durante o estudo, também tinham sido proibidas de serem utilizadas, foram liberadas de uso, uma vez que não interferem no problema em questão (HURD, 1996).

GARCIA et al. (1999) explicitam as vantagens da utilização de escórias de aciaria elétrica em pavimentação. Os autores colocam que a camada superior de um pavimento é uma das mais importantes devido às cargas verticais e horizontais aplicadas pelas rodas dos veículos. E que as escórias oxidante de aciaria elétrica (geradas na Comunidade Autônoma do país Basco), pelas propriedades físicas apresentadas após adequada classificação, são apropriadas para obter uma boa resistência de aderência pneu. Como todos os agregados utilizados em misturas asfálticas devem atender as especificações estabelecidas em norma (limite máximo segundo ASTM D 4792 e índice IGE), o risco da instabilidade volumétrica será reduzido em função do encapsulamento e função impermeabilizante do betume.

Os mesmos autores colocam que além da utilização em misturas asfálticas, as escórias podem ser empregadas em bases e sub-bases desde que atendam as especificações PG3-75. Os resultados apresentados nos ensaios realizados atenderam esta especificação: 85% dos casos de expansão foram inferiores a 0,5 % (ASTM D 4792); 91 % dos fatores analisados têm índice IGE (Índice de Desgaste Acelerado, NTL-361) menor que 1% e a distribuição granulométrica foi completada com areia natural. Com base na avaliação em revestimentos betuminosos aplicados em uma rodovia, os autores sugerem que seja realizado um controle pelos usuários, atendendo as especificações constantes na tabela 3.2.

**Tabela 3.2** Controle externo da escória de aciaria elétrica em aplicações rodoviárias (GARCIA et al., 1999)

Óxido de Cálcio Livre (%)	Quantidade (t)	Expansão (%) (ASTM D-4792)	IGE (NTL – 361)
< 1,0	1000	< 0,5	< 1,0 %
> 1,0	500	< 0,5	< 1,0 %

Segundo Urbina<sup>1</sup> et al. apud LIMA (1999), estudos realizados em agregados de escórias de aciaria elétrica, também geradas na Comunidade Autônoma do País Basco, mostram que sua alta angulosidade e resistência ao impacto e ao desgaste conferem às escórias propriedades para serem empregadas como agregado para misturas betuminosas para camadas superficiais de rodovias.

VIKLUND-WHITE e YE (1999) colocam que na Alemanha a principal utilização das escórias de aciaria elétrica é para pavimentação e camadas que necessitam alta abrasão. Os concretos asfálticos com escória produzidos há mais de 20 anos apresentam um aumento de vida útil superior a 30 % quando comparados com asfaltos de agregados naturais.

Quanto ao comportamento das escórias LD, algumas pesquisas foram desenvolvidas. LÓPEZ et al. (1989) afirmam que a utilização de escórias LD na pavimentação de rodovias está baseada em uma série de propriedades interessantes das escórias, quais sejam: resistência mecânica, à abrasão e ao choque, como consequência de sua elevada dureza; excelentes propriedades antiderrapantes (elevada rugosidade superficial), decorrentes da sua elevada macroporosidade e resistência à abrasão; elevada densidade; excelente cubicidade e coeficiente de forma.

NOMURA e ENOKIDO (1981) em extensivos estudos realizados em escórias LD e em sub-bases de rodovias utilizando estas escórias com diferentes idades - recém saídas do forno, com três e seis meses de cura, concluem que a realização de misturas da escória LD com escórias de alto-forno pode atribuir melhores propriedades à base de rodovias. Verificou-se também que bases confeccionadas apenas com escórias LD apresentaram um acréscimo de resistência ao desgaste com o tempo. Os autores mostram que as escórias LD são estáveis, e que este fato é decorrente da superfície externa da escória que é estabilizada desde baixas idades, através do seguinte mecanismo: os espaços vazios das escórias são preenchidos com vários tipos de precipitados ou gel dissolvido das escórias. Dentro da sub-base, depois da compactação, a dissolução dos compostos da escória continua na presença de umidade. As pequenas frações de escória são levadas para dentro

<sup>1</sup> de URBINA, G.; SAN MARTIN, R.; de CASTRO, M.; ELIAS, X. (1996) Valorización de escorias procedentes del proceso de fabricación de acero en hornos de arco eléctrico. Resúmenes, Julio/Agosto (31): 66-69.



dos seus vazios e são unidas pelos compostos resultantes da dissolução. A resistência desta união aumenta com o tempo, deixando a sub-base progressivamente estável.

Na tabela 3.3 pode ser visto os ensaios típicos realizados em agregados para pavimentação sejam rocha britada, cascalho ou escórias (FEATHERSTONE, 1998), preconizados por normas nacionais e internacionais.

**Tabela 3.3** Ensaios típicos para agregados para pavimentação

<b>Ensaio</b>	<b>BS/ASTM AASHTO*</b>	<b>Requisitos</b>	<b>DNER 262/94 Requisitos</b>	<b>Valores típicos para escória de aciaria</b>
Resistência a britagem (esmagamento)	812 parte 3	30 % max.		20 %
Resistência ao impacto	812 parte 3	25 % max		14 %
Resistência à abrasão	812 parte 3	10 % max.		3 %
Índice de polimento	812 parte 3	> 60 (Ótimo)		60-65
Densidade Aparente	812 parte 2	1700 – 1900		>1900 kg/m <sup>3</sup>
Índice de Esfoliação	812 parte 1	35 % max		6 %
Massa unitária	812 parte 2	-	1,5 a 1,7 kg/dm <sup>3</sup>	
Massa Específica			3 a 3,5 g/cm <sup>3</sup>	3,5
Absorção de água	812 parte 2	4 % max.	1-2 % (NBR 9937)	0-2 %
Resistência à sulfato de magnésio	812 parte 121	12 % max.		0 – 1.5 %
Valor de ph	-	-		10 – 14
Teor de óxido de cálcio livre	4550 part 2	-		0 – 2 %
Agregado para sub-base (Especificação)	ASTM 2940	-		-
Expansão por hidratação	ASTM D 4792	-	< 3,0 % PTM - 130	< 0.5 %
Abrasão Los Angeles	ASTM C 131-81	-	≤ 25 % NBR 6465/84	14 %
Adesão	ASTM D3625-91	-		90 – 100 %
Taxa de desgaste por rolagem	ASTM DD 184	-		-- > 200 %
Agregados para pavimentação	BS 63 Parts 1 and 2 1993	-		
Ensaio de CBR (Índice de Suporte Califórnia)	D 1883	-		200 %

\* American Association of State Highway and Transportation Officials  
Fonte: (FEATHERSTONE, 1998; DNER, 1994)

Com base nas pesquisas realizadas, as escórias de aciaria, elétricas e LD, são recomendadas para uso em pavimentação devido às suas características de alta resistência à abrasão e impacto, excelentes propriedades de atrito, alta rugosidade e alta aderência ao

asfalto. Estas propriedades fazem delas um material adequado para ser usado na camada superior do pavimento, a qual está submetida a grandes solicitações causadas pelas cargas aplicadas pelas rodas dos veículos. As principais restrições quanto ao seu uso são a expansibilidade (recomendando-se que sejam empregadas escórias curadas), a formação da tufa e um possível aumento do consumo de asfalto e cimento em relação aos agregados.

### **3.2 USO EM CONCRETOS E ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND**

A utilização da escória em concretos e argamassas pode se dar como substituição ou adição ao cimento, como agregado miúdo, como agregado graúdo ou ambos simultaneamente.

#### **3.2.1 Utilização como matéria-prima ao cimento**

A composição química das escórias de aciaria é bastante similar à do cimento Portland, com exceção do alto teor de ferro que se encontra no estado di e trivalente e a presença substancial de óxido de cálcio livre. Entretanto, há algumas diferenças, principalmente do ponto de vista de composição mineralógica. A principal fase ferrosa das escórias é a wustita, que não ocorre no cimento Portland. Este mineral pode reagir com cerca de 27 % do cálcio (MURPHI et al., 1997), cálcio este que poderia reagir para formar silicato tricálcico, verificando-se uma quantidade menor do composto.

O uso como cimento é bastante atrativo, uma vez que o consumo energético envolvido no processo de clinquerização é bastante alto, requerendo acima de 4 gigajoules por tonelada de cimento (MURPHI et al., 1997). Além disso, tem-se uma alta liberação de CO<sub>2</sub> para atmosfera, durante a calcinação do carbonato de cálcio, cerca de 1 tonelada por ton de cimento (MEHTA, 1999).

Segundo SUN et al. (1993), na China, onde comercialmente vem sendo produzido o cimento de escória de aciaria, é possível economizar, para cada tonelada deste cimento, 10 kwh de energia e 25 kg de carvão, quando comparado com a produção do cimento portland comum.

Os resultados das investigações realizadas neste âmbito têm apontado para a viabilidade de uso, apesar de poucos serem os estudos empregando apenas a escória de aciaria, sem nenhuma outra adição (CERJAN-STEFAOVIC et al., 1997). Nenhum dos trabalhos apresentaram avaliação do ponto de vista ambiental, nem das escórias e nem dos produtos que as incorporaram.

Na China, o cimento de escória de aciaria (composto principalmente por escória de aciaria, acrescido escória de alto-forno e cimento Portland) é comercializado há mais de 20 anos (SHI e QIAN, 2000). Este cimento apresenta a vantagem de ter baixo custo energético,



alta resistência à abrasão, baixo calor de hidratação e ganho de resistência ao longo do tempo. Entretanto, apresenta uma maior tempo de pega e menor resistência a baixas idades quando comparada ao cimento Portland.

SHI e QIAN (2000) estudaram a ativação de escórias de aciaria para melhorar as propriedades deste cimento de escória comercializado na China. Foram estudados os tempos de início e fim de pega, considerado como aspecto negativo deste cimento, e à resistência à compressão. Foram avaliadas escórias com duas granulometrias. Em relação a resistência à compressão, o processo de ativação aumentou significativamente a resistência do cimento de escória com finura # 325, sendo este maior que a de finura # 425 de escória. Os tempos de início e fim de pega, para finura # 325 do cimento foi efetivo, mas o mesmo não se observou para o cimento com finura # 425.

O maior número de estudos realizados da escória de aciaria na fabricação do cimento referem-se às escórias de conversor LD, na sua grande parte apresentando resultados favoráveis ao seu uso (LEVERT,1982; DONGXUE et al.,1997; TÜFEKÇI, 1997; MONSHI e ASGARANI,1999).

DONGXUE et al. (1997) avaliaram, através de argamassas, o desempenho mecânico de 8 misturas com escórias de aciaria LD (30 %), escória granulada de alto-forno (30 %), clínquer (33%), gesso e adições misturadas e moídas em diferentes granulometrias. A finura dos cimentos foi abaixo de 2,5 % (resíduo na peneira 0,08mm).

Os resultados experimentais mostraram que a resistência aos 28 dias de cimentos com escórias, àqueles que possuem apenas 30 % de clínquer, são similares aos do cimento Portland puro. Também foi bom o desempenho quanto à ação de sulfatos e cloretos, mantendo a mesma resistência e até acréscimo em alguns casos, ao contrário do cimento de referência que apresenta um decréscimo de 17 % na resistência após ter sido imerso em sulfato de magnésio.

Foi analisada também a porosidade, como uma forma de avaliação do volume de produtos hidratados. A porosidade conferida pelos dos cimentos com escória aos 7 e 28 dias foi um pouco maior do que a proporcionada pelo referência, porém ambos apresentaram a mesma distribuição de poros. A porosidade dos primeiros a longas idades (3 anos) decresceu substancialmente, passando de um diâmetro médio inicial dos poros de 31,0 nm e 25nm para 9,9 nm e 14nm após este período. Os autores concluíram que como os cimentos com escória apresentam uma hidratação lenta, os produtos de hidratação vão preenchendo os espaços vazios e aumentando a densidade da estrutura. Com isso proporcionam um aumento de durabilidade. Com base nos resultados os autores concluíram que é possível produzir cimentos com finura # 525, que não apresentam problemas de baixa resistência a baixas idades e nem retardo de pega. Os cimentos com escória apresentam

boa durabilidade, tais como boa resistência a sulfatos e baixa carbonatação, além de reduzir a reação álcali-agregado.

XUEQUAN et al. (1999), também com escórias LD geradas em Taiwan (China), desenvolveram um cimento feito de clínquer, escórias LD, cinza volante e mais algumas adições, como gesso e aluminita. Foram analisados resistência mecânica, tempo de pega, retração por secagem, resistência ao sulfato, carbonatação e reação álcali-agregado. Foi usado a proporção de 30 % de escória e 20 % de cinza volante.

MONSHI e ASGARANI (1999) avaliaram o desempenho de seis diferentes misturas de escórias de alto-forno e aciaria de conversor LD. O proporcionamento dos materiais foi feito com base no fator de saturação de cal (LSF), taxa de sílica (SR) e taxa de alumina (AR), calculados pelas equações 3.1, 3.2 e 3.3 e pode ser visto na tabela 3.4.

**Tabela 3.4** Composição e análise das seis diferentes misturas (MONSHI e ASGARANI, 1999)

Amostra	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Calcário (%)	40,0	49,0	57,0	40,0	44,0	64,0
Escória de Alto-forno (%)	40,0	41,0	37,0	45,0	34,0	36,0
Escória de Aciaria (%)	20,0	10,0	6,0	15,0	22,0	0,0
LSF	80,5	83,0	90,3	74,8	89,0	96,0
SR	2,3	2,8	3,2	2,5	2,0	4,2
AR	0,8	1,4	2,0	1,1	0,7	6,3

$$LSF = \frac{100(CaO + 1,5)}{2,85SiO_2 + 1,18Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} \quad (3.1)$$

$$SR = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (3.2)$$

$$AR = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3.3)$$

As misturas foram preparadas em uma cimenteira em Isfahan, Irã e queimadas em forno em planta piloto. Após a queima, os clínquers foram esfriados, moídos e misturados com 3 % de gesso.

As misturas que apresentaram melhores propriedades mecânicas foram as que possuíam maior fator de saturação de cal e fase alita ( $C_3S^2$ ). Na mistura M6, como não foi utilizada escória de aciaria, o conteúdo de ferro foi baixo e o SR e AR foram altos, requerendo, conseqüentemente, uma maior temperatura de queima para diminuir a

<sup>2</sup>  $C_3S$ :  $Ca_3SiO_5$



quantidade de óxido de cálcio livre, necessitando assim um maior controle no processo. As propriedades e os resultados obtidos encontram-se na tabela 3.5.

**Tabela 3.5** Propriedades físicas dos cimentos produzidos e análise de fases por difração de raio-x (MONSHI e ASGARANI, 1999)

		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		3662	3397	3801	3619	4053	5453
Expansibilidade (mm) ASTM C151-84		0	0	2	1	1	41,5
Óxido de cálcio livre (%)		0,6	0,4	1,4	0,3	0,4	7,3
Resistência à Compressão (kg/cm <sup>2</sup> )	3 dias	12,5	16,7	156,3	18,8	100,0	139,6
	7 dias	16,5	22,9	204,2	25,0	116,7	166,7
	28 dias	20,8	91,7	362,5	33,3	256,3	312,5
Fases (%)	C <sub>3</sub> S <sup>a</sup>	-	0,45	0,91	0,45	1,00	1,09
	C <sub>2</sub> S <sup>b</sup>	-	0,70	0,55	0,55	0,52	0,52
	C <sub>3</sub> A <sup>c</sup>	-	1,09	0,66	0,42	0,54	0,45
	C <sub>4</sub> AF <sup>d</sup>	-	0,60	1,00	1,00	0,80	0,60

C<sub>3</sub>S: 3CaO.SiO<sub>2</sub>

C<sub>2</sub>S: 2CaO.SiO<sub>2</sub>

C<sub>3</sub>A: 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

C<sub>4</sub>AF: 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

DUDA (1986) estudou o desempenho mecânico e durabilidade de argamassas e pastas de clínquer com escória LD, clínquer com escória LD e escória de alto-forno, simplesmente escória LD com alto-forno. Todas estas misturas foram comparadas ao cimento Portland comum. Segundo suas investigações, argamassas com cimento de escória LD mais clínquer apresentaram ganho de resistência mais lento, atingindo aos 6 meses de idade, um nível de resistência pouco inferior ao alcançado pela argamassa de referência aos três meses. Observou-se um maior volume de poros e uma menor resistência a sulfatos. O conteúdo de hidróxido de cálcio avaliado foi variável. Quando adicionado escória de alto-forno à mistura, o desempenho quanto a resistência a sulfatos foi excelente, observando-se um baixo volume de poros e um baixo conteúdo de hidróxido de cálcio. O ganho de resistência foi mais lento, superior a 6 meses, para atingir os mesmos níveis de resistência que os apresentados pelo referência. E quando utilizadas apenas escórias, o ganho de resistência foi muito mais lento, superior a 18 meses. Apresentou uma excelente resistência a sulfatos e baixo conteúdo de hidróxido de cálcio.

LITTLE (1999) apresenta como limitação de uso das escórias de aciaria como matéria-prima, os altos custos envolvidos com a britagem e moagem das escórias.

Apesar do uso das escórias de aciaria, elétrica e LD, normalmente se dar acompanhada de outro resíduo a maioria dos trabalhos apontam para viabilidade técnica da

sua utilização como matéria-prima ao cimento. Além do aspecto econômico, verifica-se que cimentos com escórias de aciaria apresentam mesmos níveis de resistência mecânica e bom desempenho do ponto de vista de resistência a cloretos e sulfatos. Verifica-se, como aspectos negativos, menores resistências a baixas idades e um maior tempo de pega.

### **3.2.2 Utilização como adição a concretos**

MOURA et al. (1999) confeccionaram concretos, em três diferentes proporções, empregando a escória de aciaria elétrica como adição ao cimento na proporção de 10 %, em massa. Para todas as relações água/aglomerante e para as diferentes idades, houve ganho de resistência à compressão. A escória de aciaria empregada foi armazenada durante 8 meses a céu aberto e dois meses em ambiente de laboratório. Foi submetida à avaliação da expansibilidade através das agulhas Le Chatelier, não apresentando expansibilidade.

Posteriormente, com base em um estudo em argamassas foi determinado, para a mesma escória, o teor ótimo de adição, obtendo-se o valor de 20 %, teor este adotado para confecção de novos traços de concretos.

Para todas as propriedades mecânicas avaliadas, os resultados obtidos para os concretos com adição de 20 % de escória de aciaria foram superiores aos dos concretos sem adição. No ensaio de resistência à compressão, o ganho de resistência alcançou a ordem de 30 %. Além do ganho de resistência, obteve-se uma redução de consumo de cimento para todos os traços, chegando-se a uma diminuição de até 11 kg de cimento por m<sup>3</sup> (MASUERO et al., 2000a).

Do ponto de vista de expansibilidade, foram realizados três ensaios adicionais: ensaio em autoclave, dilatação em água e método das barras. Nos quatro ensaios realizados, verificou-se que esta escória não apresentava problemas de expansão. Os valores obtidos nos distintos ensaios foram muito baixos, alguns desprezíveis (caso de autoclave), ficando sempre muito abaixo dos preconizados pelas distintas normas.

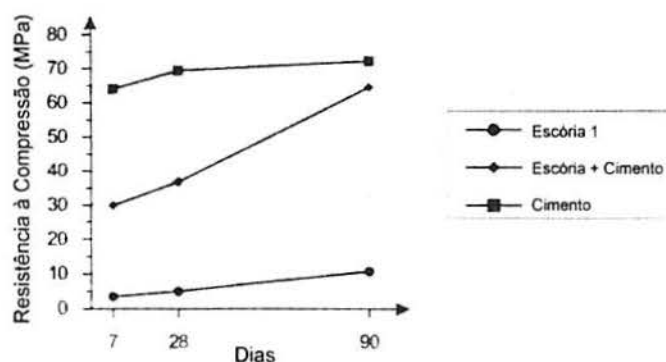
Os mesmos concretos foram analisados do ponto de vista de durabilidade, através de ensaios de absorvidade, ataque a sulfatos e carbonatação. Em todos os ensaios os concretos com escória apresentaram desempenho superior aos de referência. Em termos de carbonatação, apenas o concreto com relação água/aglomerante igual 0,6 carbonatou, com uma profundidade de carbonatação = 14,7 mm, enquanto que no de referência, para esta mesma relação, a profundidade carbonatada foi de 17,4, além do concreto de relação 0,5 ter chegado a 2,0. Quanto à absorvidade, o maior aumento da resistência capilar foi para os concretos com escória com relação a/agl = 0,6 , tendo um acréscimo de 24,7 %.



Já para sulfatos o concreto com melhor comportamento foi o com relação 0,5, com um aumento na resistência química de aproximadamente 25 % em relação ao de referência.

SRINIVAS et al. (1987) estudaram o comportamento de concretos com diferentes teores de substituição e adição de cimento por escória, tentando verificar a influência na resistência mecânica da escória oxidante e escória redutora. O proporcionamento utilizado para confecção dos concretos foi de 1: 1: 1,5 (em massa). Uma primeira série foi realizada com adição de escória, ora oxidante ora redutora, na proporção de 10, 20, 30 e 40 %, em relação à massa de cimento. Para o mesmo traço, uma segunda série foi testada com substituição de 100 % do cimento pelos dois tipos de escórias, separadamente. Para avaliar o alto teor de ferro apresentado pelas escórias foi realizada uma terceira bateria de corpos-de-prova onde o cimento foi substituído por 5, 15, 20 e 30 % de óxido de ferro. Com base nos resultados obtidos os autores puderam observar um decréscimo de resistência com o acréscimo de escória, sendo que a taxa de declínio para escória redutora era maior que a oxidante. Foi observado, superficialmente, naqueles concretos com 40 % de escória redutora, leves protuberâncias. Esta tendência de aumento de volume também foi verificado quando substituído 100 % de cimento por escória redutora. O aumento de volume foi atribuído pelos autores como sendo consequência da hidratação do CaO. Não foi discriminada a idade das escórias. Pelo desempenho apresentado a escória oxidante foi escolhida para posteriores estudos. A inclusão de óxido de ferro não afetou desfavoravelmente a resistência do concreto.

LIMA (1999), em seu trabalho de doutorado, avaliou o comportamento mecânico de pastas usando escória de aciaria elétrica como adição, argamassas com escória como material aglomerante e agregado miúdo e em concretos como agregado graúdo e miúdo. A pasta a ser comparada com a convencional foi moldada com substituição ao cimento de 50 % em volume. O desempenho da pasta com escória não apresentou bom desempenho, como pode ser visto na figura 3.1.



**Figura 3.1** Resistência à compressão em pastas (LIMA, 1999)

A resistência à compressão de pastas com 100% e 50% de escória corresponde a 5 e 46 %, respectivamente, da resistência das convencionais, para os 7 dias de idade. Aos 28 dias houve um pequeno acréscimo percentual na resistência das pastas com escórias, evidenciando-se aos 91 dias este incremento. As pastas com 100% e 50% de escória em substituição ao cimento atingiram, respectivamente, 7 e 53 % da resistência à compressão da pasta de referência aos 28 dias. Para os 91 dias, a resistência foi 15% e 89% da resistência da pasta de referência, para pastas com substituição de 100 e 50 %, respectivamente.

O emprego da escória como aglomerante em pastas com traço de 1: 2,38 (escória: areia) resultou em valores bastantes baixos de resistência à compressão aos 28 dias: 5,0 MPa.

Em relação ao uso das escórias de aciaria como adição a concretos, poucas foram as pesquisas realizadas, com resultados contraditórios entre si. Algumas apontam a viabilidade do uso da escória curada, especificamente de aciaria elétrica, como um material potencial para utilização como adição, propiciando melhorias significativas nas propriedades mecânicas e durabilidade. Por outro lado, pesquisas apontam que seu uso acarreta diminuição de propriedades mecânicas.

### **3.2.3 Utilização como agregado**

Experiências têm sido realizadas utilizando-se escórias como agregado, algumas com a escória sofrendo simplesmente a britagem como beneficiamento e outras com alteração do processo de resfriamento.

De forma geral os resultados obtidos nas pesquisas realizadas indicam um bom desempenho das escórias para esta utilização, apesar dos autores sempre salientarem a importância da utilização de escórias já expostas ao meio ambiente por um determinado tempo.

AKINMUSURU (1991) confeccionou concretos com dois traços distintos 1:1,5:3 e 1:2:4 onde foi comparado o desempenho mecânico e de durabilidade (absorção de água) do concreto de referência com concretos onde substituiu-se completamente o agregado miúdo e o graúdo, respectivamente, por escórias resfriadas lentamente ao ar. As relações água/cimento variaram de 0,52 a 0,55 para obter uma faixa de abatimento entre 90 a 100 mm, respectivamente, e as escórias foram estocadas a céu aberto durante o período de três meses. Os resultados dos concretos com escórias foram superiores aos de referência. O referido autor não especificou qual tipo de escória de aciaria estudado.

Para LIMA (1999), o uso de escória de aciaria elétrica como agregado miúdo em concretos deve atender uma distribuição granulométrica contínua, a qual para compô-la



devam ser utilizadas escórias com dimensões superiores a 100 mm e não inferiores a 5 mm, uma vez que nesta faixa é que se encontra o periclásio. Para avaliação do desempenho mecânico da escória como agregado miúdo, a referida autora moldou argamassas com traço 1: 4,16 (cimento: escória) as quais foram comparadas com uma de referência 1: 3 (cimento : areia). A resistência à compressão foi determinada em corpos-de-prova cúbicos, obtendo-se um acréscimo em relação ao referência de 44 % e 52 % para as idades de 7 e 28 dias, respectivamente. A mesma tendência foi observada na resistência à flexão de corpos-de-prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm, com incremento na resistência de 39 % e 33 % para as respectivas idades.

A avaliação feita por LIMA (1999) em concretos usou como critério a fixação da relação água/ cimento em 0,50. As misturas utilizadas podem ser vistas na tabela 3.6.

**Tabela 3.6** Características dos concretos confeccionados para o estudo do comportamento mecânico e de durabilidade (LIMA, 1999)

Tipo de Concreto	Teor de argamassa	Agregado miúdo + graúdo	Traço (c : a: p)	A/c (água/cimento)	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )
EAG	51	4,7	1: 1,91: 2,79	0,50	448
RAG	59	3,55	1: 1,70: 1,85		468
EAF	59	5,0	1: 2,54: 2,46		411
RAF	51	3,97	1: 1,53: 2,44		433

EAG: Concreto com substituição do agregado graúdo por escória;

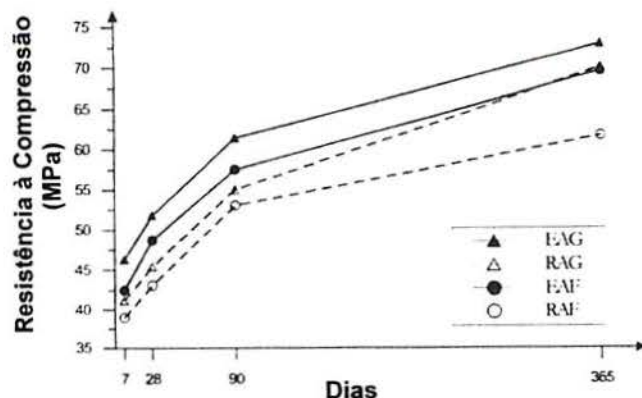
RAG: Concreto de referência para o agregado graúdo;

EAF: Concreto com substituição do agregado miúdo por escória;

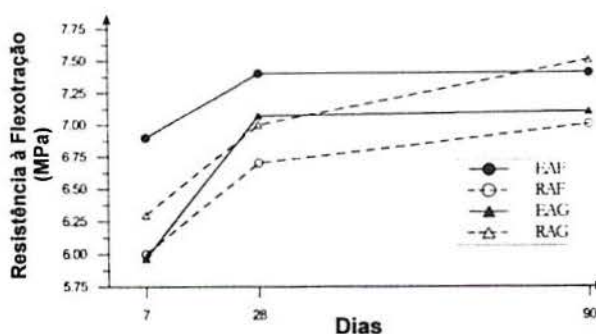
RAF: Concreto de referência para o agregado miúdo;

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão (em corpos-de-prova cilíndricos) e flexão estão evidenciados nas figuras 3.2 e 3.3.

Foi possível observar que os concretos onde foi empregada a escória como agregado graúdo ou miúdo apresentaram resistências superiores aos de referência, sendo que, nestes últimos foi mais acentuado o incremento. A autora atribui o fato provavelmente à hidraulicidade da escória. Quanto à resistência à flexão o mesmo comportamento não ficou evidenciado, apresentando todos os concretos o mesmo desempenho.



**Figura 3.2** Resistência à compressão em concretos (LIMA, 1999)



**Figura 3.3** Resistência à flexão em concretos (LIMA, 1999)

Do ponto de vista de durabilidade foram avaliadas a carbonatação, tanto natural como acelerada, permeabilidade, expansão e ataques da água do mar. Quanto à primeira propriedade o concreto mais carbonatado foi RAF (Concreto de referência para o agregado miúdo), seguido por EAF (Concreto com substituição do agregado miúdo por escória), EAG (Concreto com substituição do agregado graúdo por escória) e RAG (Concreto de referência para o agregado graúdo). Quanto à permeabilidade (por capilaridade), os de melhor desempenho, na ordem foram o EAF, EAG, RAG, RAF, observando uma penetração da água, medida após a ruptura por tração indireta de 18, 28, 50, 150 mm, respectivamente.

A ação da água do mar foi avaliada através da imersão dos corpos-de-prova durante 1 ano em água marinha. Observou-se que a penetração de íons cloreto foi maior nos concretos de referência em consequência da sua maior permeabilidade. Os concretos com escória tiveram bom desempenho, não detectando-se nenhuma reação nociva a eles.

Em pesquisa semelhante, porém com escória de conversor a oxigênio, KAWAMURA et al. (1983) avaliaram concretos preparados com 4 diferentes tipos de agregados: agregados miúdo e graúdo naturais; substituição apenas do agregado miúdo pela escória de conversor a oxigênio, substituição apenas do agregado graúdo e



substituição simultânea do agregado graúdo e miúdo. Além disso avaliaram escórias com idades distintas, uma sem tempo de envelhecimento e outra com três meses exposta a céu aberto.

Alguns aspectos interessantes foram por eles observados. A distribuição granulométrica da escória é alterada com o tempo de envelhecimento, havendo uma diminuição de partículas finas passantes na peneira 1,2 mm. A alteração é atribuída à hidratação do  $\beta\text{C}_2\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{F}$  existente próximo ou na superfície da escória. As partículas finas são mantidas unidas pelos produtos de hidratação formados.

Outra observação realizada pelos autores é a diminuição da massa específica e unitária das escórias e aumento da capacidade de absorção com o tempo de envelhecimento, podendo ser explicado pelos autores pela formação de uma camada de poros constituída de produtos de hidratação na superfície das partículas.

Em relação a propriedades dos concretos com escória, observou-se nestes, um aumento da trabalhabilidade, decorrente provavelmente da forma da escória e maior massa específica. Além disso, houve um aumento do abatimento em função do acréscimo do tempo de envelhecimento da escória, possivelmente devido, segundo os autores, ao aumento do módulo de finura das escórias e à alteração superficial que passa de rugosa para mais lisa devido aos produtos de hidratação do  $\beta\text{C}_2\text{S}^3$  e  $\text{C}_2\text{F}$ . Ainda no estado fresco, os concretos com escórias apresentaram segregação, provavelmente pela falta de finos.

Do ponto de vista mecânico, os concretos convencionais apresentaram melhor desempenho. Dentre os concretos com escória, aqueles com escória envelhecida apresentaram menores resistências. Segundo os autores, este comportamento pode ter sido originado por uma fraca ligação interface/ agregado decorrente dos produtos de hidratação.

Quanto ao uso como agregado miúdo para argamassas, a escória se mostrou adequada. IDEMITSU et al. (1981) moldaram argamassas com escória de alto-forno, gesso, cloreto de cálcio e escória de aciaria, esta última em granulometria de areia. O passante na peneira # 0,088 mm foi considerado pelos autores como cimento. Foram utilizados três traços, conforme tabela 3.7. O ganho de resistência foi na ordem de 91%.

A expansão da escória foi avaliada em barras de argamassa curadas ao ar e em água à 20° C. Foi obtido uma expansão maior para as argamassas de escória do que a de referência, alcançando uma expansão de 600-1000 x 10<sup>-6</sup>, cessando o aumento da deformação após 4 semanas. A expansão diminuiu com o acréscimo de porcentagem de escória. Os autores afirmam que a expansão apresentada não pode ser atribuída ao óxido de cálcio livre (5,2%), mas sim ao sulfoaluminato de cálcio existente no gel hidratado. Isto

---

<sup>3</sup>  $\beta\text{C}_2\text{S}$ :  $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$  (Iarnita)

explica a maior expansão ter ocorrido nas primeiras idades, onde a contribuição da escória foi maior.

**Tabela 3.7** Traços utilizados e ganho de resistência das argamassas com escória de aciaria como agregado miúdo (IDEMITSU et al. (1981))

Argamassa com agregado de escória EAF: EA: G: Cl	Argamassa de Referência EAF: A: G: Cl	Ganho de Resistência (%)	
		1 semana	4 semanas
33 : 60: 4: 3	32,97: 60: 3,66: 0,37	72	8
24 : 70: 3: 3	24,06: 70: 2,67: 0,27	84	35
15 : 80: 2: 3	15,22: 80: 1,69: 0,09	91	62

EAF: Escória de alto-forno;

EA: Escória de aciaria;

A: Areia

G: Gesso

Cl: Cloreto de cálcio

Os resultados de resistência à compressão foram superiores para os concretos com escórias. Os autores atribuem este resultado ao fato de que foi realizada a substituição de materiais completamente inertes, agregado miúdo e gráudo, por material capaz de reagir com cimento. Isto corrobora o fato dos valores obtidos de resistência na substituição do agregado miúdo serem superiores aos valores obtidos quando substituído o agregado gráudo, uma vez que os primeiros possuem maior superfície específica. O comportamento frente à absorção de água dos concretos com escórias foi muito superior ao dos convencionais.

SRINIVAS et al. (1987), além de estudos da escória como substituição ao cimento, verificaram o comportamento de concretos com traço de 1: 1: 2 (em massa) com escórias oxidante e redutora em substituição à areia. A resistência aos 7 dias, única idade estudada, dos concretos com escória foi cerca de 6% superior a dos convencionais. O autor atribui este desempenho à natureza física da escória poder contribuir para o desenvolvimento de uma menor interface entre agregado/ pasta e ao aumento da resistência à tração.

O uso de escórias que sofreram processo de resfriamento também apresentaram bons resultados. MORINO e IWATSUKI (1999) estudaram escórias japonesas resfriadas de 3 formas, quais sejam: granulação com ar (resfriamento rápido), granulação com água (resfriamento semi-rápido) e resfriada com água, com uma maior remoção de aço. Só é possível empregar a escória granulada com ar como agregado miúdo. A tabela 3.8 mostra os principais minerais encontrados em cada tipo de escória.



**Tabela 3.8** Composição mineralógica dos agregados de escória oxidante (MORINO e IWATSUKI, 1999)

Tipo de escória	Principais compostos mineralógicos	Composição mineralógica secundária
Granulada com ar	Wustita (FeO) Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) Cromita de Ferro	Magnesio Ferrita (MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) Rankinita (Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ) Gelenita (Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> )
Granulada com água	Wustita (FeO) Silicato de Cálcio ( $\beta$ Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> ) Gelenita (Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> )	Óxido de Magnésio-Ferro-alumínio (MgFeAlO <sub>4</sub> ); Silicato de cálcio-magnésio ((Ca, Mg)SiO <sub>4</sub> )
Resfriada ao ar	Wustita (FeO) Gelenita (Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> ) Silicato de Cálcio ( $\beta$ Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> )	Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) Cromita de Ferro (FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) Wolastonita (CaSiO <sub>3</sub> )
Melhorada*	Wustita (FeO) Gelenita (Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> ) Silicato de Cálcio ( $\beta$ Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> ) Kirschsteinite (CaFeSiO <sub>4</sub> )	Óxido de Magnésio-Ferro-alumínio (MgFeAlO <sub>4</sub> ); Silicato de manganês-cromo (Mn <sub>3</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>12</sub> )

\* Escória granulada com água, porém com remoção de maior conteúdo de ferro metálico.

A resistência à compressão dos concretos com a escória resfriada de distintas formas não apresentou diferença significativa. Entretanto os resultados obtidos usando escórias como agregado, tanto fino como gráudo, foram bem maiores do que os com agregados de rocha natural.

Aspectos de durabilidade foram avaliados através da medida de variação de comprimento de barras de argamassas e prismas de concretos. Nestes últimos não foram observadas fissuras nos prismas confeccionados com escória granulada ao ar. Com os moldados com escórias granuladas com água e resfriada ao ar a expansão foi quase desprezível, porém o aumento da expansão se deu após 3 anos, não sendo maior que 0,03%. As expansões nas argamassas mostraram a tendência dos prismas de concreto, não sendo observado fissuras nos 39 ou 48 meses de ensaios.

Avaliação complementar foi feita, colocando-se corpos-de-prova em uma praia, próxima a um dique, em ambiente marinho. Observou-se que a partir de 1 ano, organismos marinhos começaram a aderir ao concreto, não desagregando-o.

Resultados semelhantes foram encontrados em estudos realizados com escória proveniente da China resfriada rapidamente. O processo de resfriamento da escória consistiu basicamente de quatro estágios: inicialmente resfriamento ao ar onde a escória permaneceu durante 4 minutos disposta de forma a não ficar com uma altura superior a 10 cm. A seguir, sofreu continuamente um resfriamento com água durante 20 minutos, para abaixar a temperatura a 500° C. Posteriormente, a escória foi transportada em caminhões para uma área onde sofreu outro resfriamento com água durante 4 minutos, diminuindo a temperatura a 200°C. E por último foi colocada em um tanque com água e resfriada de cerca

de 60°C até ficar pronta para a separação magnética. Este processo de tratamento foi considerado pouco poluente, forneceu partículas de 30-50mm com baixo teor de óxido de cálcio livre (2-4%), além de evitar o risco de explosão decorrente do vapor gerado ser evitado uma vez que a água foi jateada sobre finas camadas de escórias (MONTGOMERY e WANG, 1991).

Os traços dos concretos analisados encontram-se na tabela 3.9. A escória foi considerada como agregado graúdo, embora a distribuição granulométrica seja de uma areia, como pode ser visto na tabela 3.10.

**Tabela 3.9** Proporcionamento empregado na produção dos concretos (MONTGOMERY e WANG, 1991)

A/c	Cimento	Areia	Brita	Escória	Traço	Escória (Esc + brita)	
						(Volume) %	(Massa) %
0,5	420	620	1150	0	1:1,48:2,74:0,0	0	0
			920	286	1:1,48:2,19:0,68	20	24
			690	572	1:1,48:1,64:1,36	40	45
			460	859	1:1,48:1,10:2,04	60	65
			230	1145	1:1,48:0,55:2,73	80	83
			0	1431	1:1,48:0,00:3,40	100	100

**Tabela 3.10** Distribuição granulométrica do agregado de escória (MONTGOMERY e WANG, 1991)

	Malha da peneira (mm)				
	20	15	10	5	2,5
% Retida Acumulada	15	9,5	61,3	98,4	98,4

Os autores afirmam que a escória utilizada em seus estudos possuem estabilidade suficiente para ser empregada como agregado para concretos, apresentando um teor inferior a 4 % de óxido de cálcio livre e não existindo óxido de magnésio na forma de periclase, mas apenas em solução sólida. Os ensaios mecânicos mostraram que a resistência à compressão, cisalhamento, flexão e módulo de elasticidade aumentam com o acréscimo de agregado de escória. Concretos contendo apenas escória como agregado graúdo tiveram sua resistência à compressão e cisalhamento elevadas em 45% e 120 %, respectivamente, em relação ao concreto com agregado convencional.

Em trabalhos complementares (MONTGOMERY e WANG, 1992), foi investigado a fragilidade e resistência à fratura de agregados com processos de resfriamento anteriormente descrito. Em relação a estas propriedades, o índice de fragilidade foi bem menor que aos correspondentes concretos com agregados naturais, tornando-se mais



pronunciado com o aumento da resistência, sendo assim fundamental para concretos de alta resistência. A resistência à fratura também aumentou quando da utilização da escória, apresentando um fator de intensidade de tensão aproximadamente 10% superior aos concretos convencionais.

GUTT (1972) é categórico ao afirmar que as escórias de aciaria não devem ser utilizadas em concretos estruturais em decorrência dos compostos metaestáveis existentes nas mesmas, porém o autor não faz referência se no caso de ser alterado o processo de resfriamento, a recomendação permanece.

Outra experiência de escória como agregado é para blocos de concreto.

LOUZADA (1991) confeccionou blocos de concreto onde a escória de aciaria LD e de alto-forno foram usadas como agregado, nas proporções indicadas na tabela 3.11.

**Tabela 3.11** Quantidade de materiais empregados e resultados de resistência à compressão

Traços	Consumo (kg)/m <sup>3</sup> de concreto			
	Traço 1 1: 5: 8,5	Traço 2 1: 3: 8,5	Traço 3 1: 3: 7	Traço 4 1: 2,5: 6
Cimento	185	229	255	298
ELD	1580	1963	1821	1700
EGAF	916	683	760	739
A/c	0,36	0,44	0,4	0,44
R I 28 dias (MPa)	1.01	0.74	1.03	1.22
R II 28 dias (MPa)	2.77	R III 28 dias (MPa)		
	-	4.07	5.32	6.00

ELD: Escória de aciaria LD;

EGAF: Escória granulada de alto-forno;

Traço 1: Traço empregado em uma empresa de produção de blocos;

Traços 2, 3, 4: Traços elaborados baseados no ensaio de massa unitária no estado compactado seco;

R I 28 dias: Média da resistência à compressão de blocos curados como na produção;

R II 28 dias: Média da resistência à compressão de blocos permanecidos imersos em água por 7 dias

R III 28 dias: Média da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos

Os blocos com o traço e cura empregados pela empresa fabricante de blocos não atenderam às exigências estabelecidas pela NBR 7173 (1982) - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural. Entretanto, alterando o processo de cura houve um aumento de 174 % na resistência à compressão, mostrando que blocos com escórias são potencialmente viáveis, porém tem de ser feito controle no processo de cura. Segundo a autora, foi realizado o ensaio de expansão, conforme PTM-130, apesar de não apresentar resultados.

A maioria das pesquisas realizadas dizem respeito à utilização das escórias resfriadas lentamente, sem alteração do processo de resfriamento, passando apenas por um processo de britagem. De forma geral, os estudos realizados apontam um desempenho

sempre superior dos concretos com escórias como agregados, ressaltando-se a importância da utilização de escórias curadas.

### 3.3 USO COMO FERTILIZANTE E CORREÇÃO DE SOLOS

Escórias de aciaria são empregadas em vários países do mundo como corretivo de solos ácidos. Na Finlândia, cerca de 40% do total de escória de conversor a oxigênio é empregada para este fim, caracterizando-se como um dos principais usos (HILTUNEN et al., 2000). Para serem adequadas para este uso é necessário que sejam moídas em dimensões inferiores a 4mm de diâmetro e com uma certa quantidade de partículas inferiores a 150 µm (FEATHERSTONE, 1998). A escória é um material básico, de alto teor de óxido de cálcio e com uma taxa de incorporação ao solo lenta, de forma que é usada em culturas de ciclos longos (KRUGER, 1995). Escórias LD ou BOF apresentam uma capacidade de neutralização de 40% para CaO e 70% para CaCO<sub>3</sub> (FEATHERSTONE, 1998).

As escórias granuladas quando comparadas com as resfriadas lentamente apresentam vantagens do ponto de vista econômico, uma vez que dispensam a britagem, pois são produzidas em dimensões inferiores a 5 mm. Do ponto de vista de qualidade, apresentam maior solubilidade do óxido de cálcio e magnésio e faz disponível uma maior quantidade de nutrientes no solo.

Além da alteração do pH de solos de cultivo, outra aplicação da escória, dentro da área da agricultura, é o emprego como fertilizantes (BLUNK, 1978). O seu emprego aporta uma série de micronutrientes necessários para o crescimento das plantas.

O óxido de magnésio e silício são vantajosos para o crescimento das plantações de arroz; escórias LD são principalmente usadas para cultivos em campos secos e o ferro e o óxido de cálcio são recomendáveis para plantações de trigo, espinafre e para pastos (IBS, 1995).

Além do fornecimento de micronutrientes, a escória melhora propriedades físicas do solo, densidade e porosidade, que favorecem o transporte hídrico e, conseqüentemente, contribue para o aumento da produção agrícola e qualidade das colheitas ( LOPEZ et al., 1989).

Outra vantagem da utilização das escórias é que devido ao pH mais elevado, diminui a mobilidade dos metais pesados e reduz a quantidade de alumínio livre (Balcazar<sup>4</sup> apud LITTLE, 1999).

---

<sup>4</sup> BALCAZAR, N. Agronomic use of slags. Managing Steel Mill Wastes and By-products Conference, Gorham/Intertech Consulting. Antwep, Belgium, 11-14, may, 1998



Segundo KRÜGER (1995), o uso da escória como fertilizante tem decaído em virtude da redução do fósforo nas escórias, decorrente tanto da diminuição do fósforo carregado nos conversores LD quanto da desfosforação do gusa.

Como agente estabilizador de solos, a escória apresenta bom desempenho. Em estudos realizados por AKINMUSURU (1991) onde foi avaliado solos com adição de até 15 % escória (curada – 3 meses) moída, os resultados obtidos mostraram que o teor ótimo de adição é de 10 %, melhorando uma série de propriedades tais como aumento de peso seco, CBR (California Bearing Ratio) e resistência acoplada, com conseqüente decréscimo da permeabilidade. O autor atribui a melhora das propriedades ao preenchimento dos vazios uma vez que a escória é colocada moída.

O emprego das escórias de aciaria elétrica e LD como uso agrônômico é bastante vantajoso, não apresentando nenhum inconveniente. Além da vantagem econômica, de possuir um custo relativamente mais baixo do que os tradicionalmente empregados, apresenta a vantagem de elevar o pH, favorecendo o crescimento vegetal e diminuindo a mobilidade dos metais pesados.

## 4 CARACTERIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS

A diferença que existe entre as propriedades das escórias de alto-forno e de aciaria é conseqüente do processo de produção.

O processo de redução em alto-forno é uma operação contínua e com certa uniformidade, gerando uma escória, escória de alto-forno, com pequena variação na composição química. Os óxidos de cálcio e magnésio presentes se combinam formando sempre silicatos e alumino-silicatos (KOURTBAOUI et al., 1993).

De forma oposta, o processo de aciaria é, descontínuo, em diferentes lotes, onde as reações nem sempre são completadas, gerando, em conseqüência, uma escória não uniforme, que pode conter óxidos de cálcio e magnésio não combinados (livres), responsáveis em geral por grande parte do caráter expansivo da escória.

Ao contrário da escória de alto-forno, onde se têm estudos desde o início do século XX sobre seu uso em cimentos, as escórias de aciaria granulada apresentam poucos e recentes estudos (DUDA, 1986; XUEQUAN, 1999; SHI e QIAN, 2000). Desta forma, os aspectos referentes à hidratação, reatividade e estrutura das escórias serão apresentados para as escórias de alto-forno. Acredita-se que as escórias de aciaria granulada, pelas características adquiridas após o resfriamento brusco, apresentem os mesmos princípios de ação e de comportamento da escória de alto-forno.

### 4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

A escória de aciaria é constituída pelos seguintes óxidos (ILAFA, 1995):

Óxidos básicos:  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,

Óxidos ácidos:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$

Óxidos anfóteros:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$

As tabelas 4.1 e 4.2 mostram a composição química média das escórias de aciaria elétrica e LD, respectivamente, em diferentes países.



**Tabela 4.1** Composição química das escórias de aciaria elétrica

Composição Química (%)	País					
	Japão <sup>1</sup>	Argentina <sup>2</sup>	Brasil <sup>3</sup>	Noruega <sup>4</sup>	França <sup>5</sup>	Bélgica <sup>6</sup>
CaO	19,81	37,14	35,1 - 37,8	25-40	47,0	29,75-50,77
SiO <sub>2</sub>	12,60	10,56	11,6 - 20,6	10-15	13,0	9,56-34,87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,78	-	-	-	25,0	-
FeO	13,51	33,95	27,6 - 39,6	20-30	-	12,38-23,73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,21	1,44	3,4 - 7,2	3-10	-	0,79-8,45
MgO	2,44	9,58	4,3 - 7,9	2-10	-	4,96-12,58
MnO	7,77	4,90	3,2 - 4,9	5-7	-	5,44
S	-	0,11	0,03 - 0,1	-	-	0,08-0,98
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,39	1,21	0,5 - 0,9	-	2	0,01-0,25

<sup>1</sup> - MORINO (1999)<sup>4</sup> - VIKLUT (1999)<sup>2</sup> - IAS (1987)<sup>5</sup> - GEORGE e SORRENTINO (1980)<sup>3</sup> - MASUERO (2000)<sup>6</sup> - INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE (1994)**Tabela 4.2** Composição química das escórias de conversores LD

Composição Química (%)	País				
	Japão <sup>1</sup>	Canadá <sup>2</sup>	Brasil <sup>3</sup>	Bélgica <sup>4</sup>	China <sup>4</sup>
CaO	44,3	41,3	40,9-49,3	28,41-50,19	48,19
SiO <sub>2</sub>	13,8	15,6	9,2-13,4	8,44-19,04	12,12
FeO	17,5	6,9	23,0-27,7	16,73-42,47	8,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5	2,2	2,4-4,3	1,67-5,13	2,58
MgO	6,4		4,4-6,7	6,28-10,3	6,44
MnO		8,9	4,5-5,2	2,04-5,86	
S			0,08-0,29	0,09-0,19	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			1,6-1,9	0,2-0,42	

<sup>1</sup> - OKUMURA (1993)<sup>4</sup> - INTERNATIONAL IRON and STEEL INSTITUTE (1994)<sup>2</sup> - EMERY (1977)<sup>5</sup> - WU et al., (1999)<sup>3</sup> - GUMIERE (2000)<sup>6</sup> - INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE (1994)

Estes óxidos são formados durante a operação de refino do aço e durante a solidificação da escória, dando origem a distintos grupos de minerais, quais sejam: silicatos, espinel, óxidos livres, fosfatos, sulfatos, óxidos de cálcio e magnésio livres. As fases mineralógicas presentes na escória são dependentes do tipo de resfriamento ao qual é submetida.

ILAFSA (1995) e MÔNACO e WU (1994) apresentam uma lista das principais fases freqüentemente encontradas nas escórias de aciaria como um todo (tabela 4.3). Apesar de uma boa quantidade dos compostos indicados terem sido encontrados por pesquisadores, verifica-se que existe uma grande variabilidade, não só entre os principais tipos de escória, elétrica e de conversor LD, mas também entre escórias do mesmo processo, como visto na tabela 4.3.

**Tabela 4.3** Principais fases minerais associadas às escórias de aciaria

Tipo de Mineral	Fórmula Química	Escória oxidante de aciaria elétrica			Escória de conversor LD	
		1	2	3	4	5
Alabandita	MnS				X	
Alita (Silicato de tricálcico)	3CaO.SiO <sub>2</sub>	X	X		X	X
Belita (Silicato dicálcico ou ortosilicato de cálcio)	2CaO.SiO <sub>2</sub>		X			X
Brownmillerita	4CaO * Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X	X			
Cal	CaO					X
Cálcio-Wustita	CaO.FeO		X			X
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	X			X	
Clinoferrossilita	Fe SiO <sub>3</sub>				X	
Cromita	FeO.Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			X		
Espinélio	MgO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				X	
Etringita	Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub>	X				
Faialita	2 FeO.SiO <sub>2</sub>				X	
Faialita – Zn <sup>6</sup>	2(FeO, ZnO) SiO <sub>2</sub>					
Ferrita de Mg	MgO.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			X		
Ferrita dicálcica	2 CaO.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					X
Forsterita <sup>6</sup>	2Mg.SiO <sub>2</sub>					
Gehlenita	2CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .SiO <sub>2</sub>	X		X		
Grünerita <sup>6</sup>	FeO.SiO <sub>2</sub>					
Ingersonita	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	X				
Knebelita <sup>6</sup>	FeO.MnO.SiO <sub>2</sub>					
Larnita	β-2CaO * SiO <sub>2</sub>	X	X		X	
Magnésio – Wustita	MgO.FeO		X			X
Magnesita	MgCO <sub>3</sub>				X	
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	X		X		
Merwinita	3 CaO.MgO.2SiO <sub>2</sub>	X	X			
Monticellita	CaO.MgO.SiO <sub>2</sub>		X			
Nagelschmidtita	2Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> .Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>				X	
Óxido de manganês	MnO				X	X
Periclásio	MgO	X			X	
Piroxênio, Dioprida <sup>6</sup>	CaO.MgO.2SiO <sub>2</sub>					
Portlandita	Ca(OH) <sub>2</sub>	X			X	
Quartzo	SiO <sub>2</sub>			X		
Rankinita	3CaO.2SiO <sub>2</sub>	X		X		
Rodonita <sup>6</sup>	MnO.SiO <sub>3</sub>					
Silicato de alumínio <sup>6</sup>	CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . SiO <sub>2</sub> 2CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . SiO <sub>2</sub>					
Srebrodolskita	Ca <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub>				X	
Tephroita <sup>6</sup>	2MnO.SiO <sub>2</sub>					
Wadsleyita	(Mg,Fe)2SiO <sub>4</sub>				X	
Wollastonita <sup>6</sup>	2CaO.SiO <sub>2</sub>					
Wustita	FeO	X		X	X	

Fonte: ILAFA (1995) e MÔNACO e WU (1994)

1- LIMA (1999)

2 - RAIT e GOLDSCHMIDT (1942)

3 - MORINO (1999)

4 - GUPTA et al (1994)

5 -SASAKI et al. (1981)

6 – Compostos mineralógicos citados por ILAFA (1995) e MÔNACO e WU (1994) como sendo os mais comuns em escórias de aciaria, porém não encontrados pelas referências 1 a 5.



As escórias de alto-forno resfriadas bruscamente, chamadas de escórias granuladas, apresentam fundamentalmente silicatos de cálcio, com alguma presença de magnésia e alumina. Estas fases minerais apresentadas, mais a alta proporção de fase amorfa faz com que se adeque perfeitamente para uso na produção de cimento, uso este dado para maior parte desta escória.

As escórias de aciaria resfriadas bruscamente indicam a presença de alita e belita, acompanhada às vezes por óxido de cálcio e magnésio livres, porém estas escórias, ao contrário das granuladas, não apresentam natureza cimentícia, devido à presença da wustita, a qual apresenta alta solubilidade para outros óxidos divalentes (MURPHY et al., 1997, MEADOWCROFT et al., 1996)

## 4.2 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

As principais propriedades físicas e mecânicas das escórias de aciaria encontram-se na tabela 4.4. Como não foi especificado o processo de origem da escória, estima-se que os valores apresentados abranjam tanto as escórias de aciaria elétrica como as de LD.

**Tabela 4.4** Propriedades Físicas e mecânicas das escórias de aciaria  
(<http://www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/ssa1.htm> acessado em setembro/2000)

Propriedades Físicas	
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	3,2 – 3,6
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1600 - 1900
Absorção (%)	< 3,0
Propriedades Mecânicas	
Abrasão Los Angeles (ASTM C131) %	20-25
Ataque por sulfato de sódio	<12
Dureza (medida pela escala de Moh's)	6 - 7
CBR (California Bearing Ratio)	> 300
Ângulo de fricção interna	40° – 50°

## 4.3 REATIVIDADE DAS ESCÓRIAS

As escórias, de uma maneira geral, são formadas no estado líquido e a altas temperaturas (maior que 1350° C).

Dependendo do regime de resfriamento aplicado, produtos com diferentes características são formados. Pode-se classificar em dois os processos: o lento e o rápido.

No resfriamento lento, a estrutura das escórias é caracterizada por fases cristalinas, as quais, do ponto de vista de aplicação, em cimento, não atribuem características hidráulicas. Nesta categoria, encontram-se, na sua maioria, todos os tipos de escória de aciaria, as quais são empregadas como agregados.

Se o resfriamento se der rapidamente, não há tempo para os íons se organizarem ordenadamente e a escória se solidificará como um produto vítreo, apresentando características hidráulicas latentes, sendo extensivamente utilizadas como matéria-prima na fabricação de cimentos. É o sistema usualmente adotado para as escórias de alto-forno.

O poder aglomerante da escória granulada pode ser explicado termodinamicamente pelo fato da estrutura vítrea reter energia de cristalização. Desta forma, os cristais apresentam um nível de energia inferior e conseqüentemente são mais estáveis (JOHN, 1995).

A utilização da escória em cimentos dependerá de sua reatividade, a qual é função da sua finura, superfície específica, teor da fase vítrea e sua composição química (TAYLOR, 1997).

Segundo HOOTON (1987), vários estudos foram realizados mostrando que geralmente a hidráulidade potencial aumenta com o acréscimo de fase vítrea, porém existem algumas divergências quanto à influência do teor da estrutura amorfa sobre a resistência. Poucos pesquisadores recomendam valores mínimos de teor de fase vítrea, apesar de escórias com teores de 30 a 65 % parecerem ser adequadas.

O teor da fase vítrea varia com a composição química, temperatura de início de resfriamento e método de resfriamento.

O aumento da relação  $\frac{(CaO + MgO)}{(SiO_2 + Al_2O_3)}$  para valores superiores a 1,15 implicará no decréscimo do grau de vitrificação, uma vez que se reduz os formadores da cadeia vítrea,  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$  (UCHIKAWA, 1986).

A composição química não somente afeta o grau de vitrificação, pela temperatura do líquido e viscosidade, como também a solubilidade e, conseqüentemente a reatividade do vidro durante a hidratação (HOOTON, 1987).

Uma série de índices, em função da composição química das escórias, são estabelecidos para estimar a qualidade das escórias com vistas a sua utilização em cimento. Estes índices foram estabelecidos a partir da correlação entre os índices e a resistência à compressão de argamassa com escórias (BATTAGIN, 1986).

Os principais índices propostos por diferentes autores e normas encontram-se na tabela 4.5.



**Tabela 4.5** Índice de hidraulicidade (COALE et al., 1973; CALLEJA, 1982; BATTAGIN, 1986; NBR 5735,1991; CINCOTTO, 1992)

Pesquisador/Norma	Índice
Blondiau	$1,45 < C^a/S^b < 1,54$ $1,8 < S/A^c < 1,9$
Venuat	$1,40 < C/S < 1,45$
DIN, Espanha e NBR 5735/80	$I_H = (C + M^d + A)/S > 1$ $> 1,4$ (Japão)
Cheron e Lardinois	$I_H = (C + 1,4M + 0,56A)/S > 1,54$
ASTM	$I_H = (C + M + 1/3A)/(S + 2/3) > 1$
Schwiete	$I_H = (C + M + (A-10))/(S+10) > 1$
Dron	$R' = \frac{C \cdot A}{(S + A)^2} > 0,18$

<sup>a</sup>: C=CaO

<sup>b</sup>: S=SiO<sub>2</sub>

<sup>c</sup>: A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<sup>d</sup>: M=MgO

Segundo CHERON e LARDINOIS (1968), a influência positiva na reatividade do óxido de magnésio é aceito por alguns autores, porém contestado por outros: para Osborn<sup>1</sup> o teor adequado seria entre 12,5 e 16%; outros autores estabelecem que até 8,0 % substituiria o óxido de cálcio. Sutterheim e Nurse<sup>2</sup> estimam que se o teor ficar entre 15 e 16% a hidraulicidade será menor. Schwiete e Dölbor<sup>3</sup> propõem que o efeito causado pelo magnésio é o oposto do cálcio.

Segundo Sutterheim e Nurse<sup>2</sup> apud YANG (1968) é possível fazer um cimento com alta hidraulicidade com escórias com teores de óxido de cálcio entre 13-21% com pequeno ou nenhum risco de formação de periclásio (óxido de magnésio livre).

Como a hidraulicidade depende não somente da composição química, temperatura e forma de resfriamento, pode-se ter escórias com mesma composição química, porém com diferentes índices de reatividade (ZHANG et al., 1983).

#### 4.4 ESTRUTURA DAS ESCÓRIAS

A estrutura dos silicatos é de especial interesse para o conhecimento das propriedades físico-químicas das escórias.

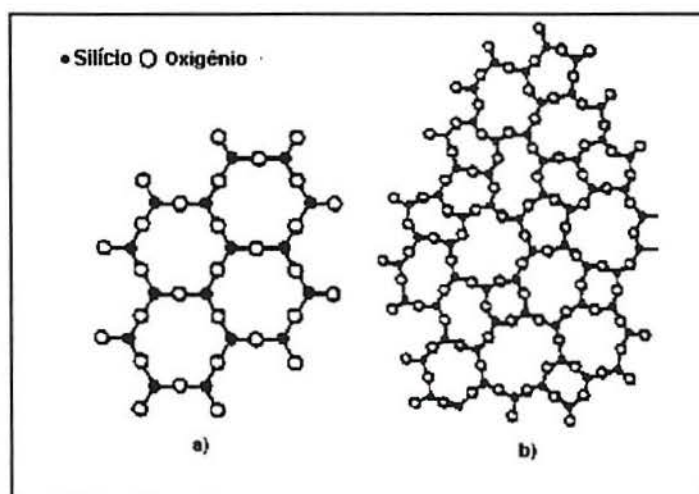
<sup>1</sup> OSBORN, E.; De VRIES, K.; KRANER, H. Optimum composition of blast-furnace slags, as deduced from liquidus data for the quaternary systems CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. Trans. AIME, J. Metals, 33-45 (1954)

<sup>2</sup> SUTTERHEIM, N.; NURSE, R. W. Experimental blast-furnace cements incorporating high magnesia slags, Mag. Of Concrete Research, 9, 101-106 (1952).

Inúmeras teorias têm sido propostas para explicar a estrutura da escória líquida. A mais aceita atualmente é a de Zachriassen (MILLS, 1995).

As escórias líquidas são constituídas tanto de cátions como  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  como de ânions tais como  $\text{O}^{-2}$ ,  $\text{SiO}_4^{-4}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ .

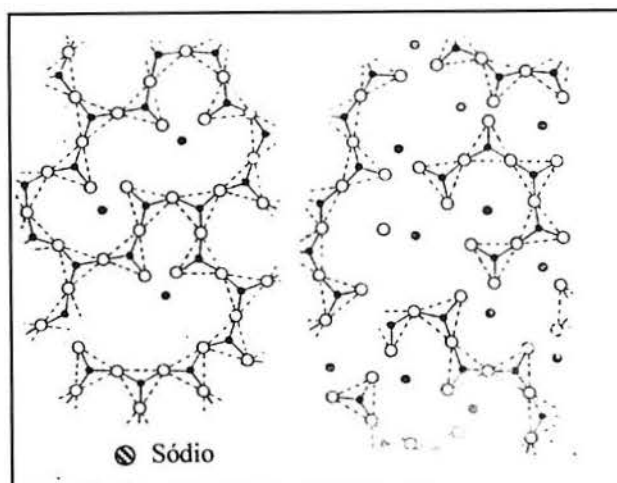
Os átomos de silício são conectados a quatro átomos de oxigênio até obter  $\text{SiO}_4^{-4}$ , arranjados sob a forma de um tetraedro. Na coordenação tetraédrica da sílica sólida, qualquer que seja a forma da mesma, quartzo, tridimita ou cristobalita, cada átomo de silício está rodeado por quatro de oxigênio, de modo que o silício pode ser considerado como o centro do tetraedro com os átomos de oxigênio nos vértices. Cada oxigênio está ligado a no máximo dois átomos de silício e a estrutura deve ser considerada como se estendendo em todas direções, formando, em decorrência dos tetraedros estarem ligados entre si, uma rede espacial de células hexagonais (LÚCIO, 1981), conforme pode ser visto na figura 4.1. A adição de cátions, tais como  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ , tendem a quebrar as ligações da cadeia de Si-O-Si, ocorrendo uma separação dos vértices de dois tetraedros (figura 4.2). À medida que os óxidos básicos são progressivamente acrescentados, a estrutura tri-dimensional é quebrada até produzir-se uma estrutura pura de  $\text{SiO}_4^{-4}$ , contendo íons  $\text{Ca}^{+2}$ , conforme mostra a figura 4.3 (JEFFES, 1975).



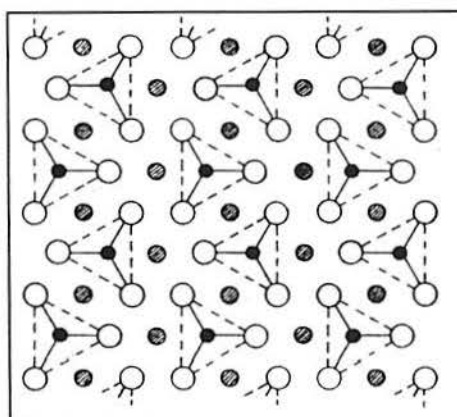
**Figura 4.1** Representação esquemática do tetraedro Si-O e estrutura da sílica no estado (a) sólido (b) líquido (MILLS, 1995)

<sup>3</sup> SCHWIETTE, H.; DÖLBOR, F. Einfluss der Abkühlungsbedingungen und der Chemischen Zusammensetzung auf die Hydraulischen Eigenschaften von Hamatitschlacken. Technische Mitteil, n1186, 70-73, Köln. 1963





**Figura 4.2** Efeito da adição de um cátion à sílica líquida (JEFFES, 1975)



**Figura 4.3** Representação esquemática da estrutura após adição sucessiva de cátions (JEFFES, 1975)

Como os cátions adicionados alteram a estrutura básica da cadeia, são chamados de modificadores de cadeia, ao passo que o silício é considerado como formador de cadeia.

Na escória, o íon  $\text{Ca}^{+2}$ , com número de coordenação 6, é o modificador de cadeia mais típico. Os modificadores estão ligados ionicamente à rede do covalente do silício. A quantidade e as características dos cátions modificadores afetam de maneira notável o comportamento dos vidros, como a solubilidade e ponto de fusão (JONH, 1995).

#### 4.5 HIDRATAÇÃO DAS ESCÓRIAS

A atividade hidráulica da escória é bem mais lenta que a do cimento, sendo em condições normais, de 6 a 8,5 %, aos 28 dias. Ao entrar em contato com a água, a escória começa a dissolver-se, liberando íons  $\text{Ca}^{+2}$ . Uma envoltória de baixíssima permeabilidade de hidróxido de alumínio é formada ao redor do grão da escória (CAMARINI, 1995), impedindo a penetração da água e a dissolução dos íons.

A dissolução desta camada, a posterior dissolução dos íons de Si e Al da fase vítrea e a hidratação da escória só são possíveis com a elevação do pH, sendo inevitável a utilização de um ativador.

No momento em que se coloca a escória em contato com uma solução de pH alto, aumenta-se a velocidade de dissolução da escória e formam-se produtos hidratados estáveis. A diferença entre o princípio de dissolução da escória e do clínquer é que a primeira é por ataque hidroxílico, ou seja, por íons de  $\text{OH}^-$ , enquanto que o do clínquer é por ataque hidrolítico, decorrente da ação das moléculas da água (JOHN, 1995).

Os principais ativadores são hidróxido de cálcio, sulfatos de cálcio e cimento Portland. Estes irão acelerar o processo de dissolução e posteriormente irá ocorrer a precipitação dos produtos hidratados.

Os produtos de hidratação da escória são similares ao encontrados em pastas hidratadas de cimento, entretanto há uma alteração nas relações C/S (do C-S-H) e C/A (TAYLOR, 1997).



## 5 FENÔMENO DA EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS

### 5.1 AGENTES E MECANISMOS CAUSADORES DA EXPANSÃO

Atribui-se que o problema da expansão das escórias é causado principalmente pela presença de óxido de cálcio livre e óxido de magnésio reativo (LEE, 1974; EMERY e HOOTON, 1977; EMERY, 1977; ORMSBY, 1978; KANDHAL e HOFFMAN, 1997; FEATHERSTONE, 1998), à metaestabilidade do silicato dicálcico (GUTT, 1972; THOMAS, 1978) e ao óxido de ferro (INOUE e SUITO, 1995; VIKLUD-White e YE, 1999; CRUZ et al., 2000).

#### 5.1.1 Óxido de Cálcio livre

Juntamente com o óxido de magnésio livre, ao óxido de cálcio livre é atribuído a causa principal da expansibilidade das escórias.

As escórias de aciaria de conversor a oxigênio são resultantes de reações entre óxidos de silício, fósforo, manganês e ferro gerados durante o sopro de oxigênio e os óxidos básicos (CaO e MgO) incorporados para promover as reações de refino e evitar o desgaste do refratário (Cruz et al., 2000), entre outras funções.

Para impedir a formação da camada passivadora de silicatos, fundentes são adicionados. Porém estes, na ausência do silício, passam a ser oxidados preferencialmente pela escória. Desta forma, a cal e o magnésio adicionados precipitam-se ou permanecem sem se dissolver. Isto explica o fato de escórias LD apresentarem altos teores de óxidos de cálcio e magnésio livres. A figura 5.1 mostra o diagrama de equilíbrio ternário do sistema CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO, onde está ilustrado a composição das escórias durante o sopro.

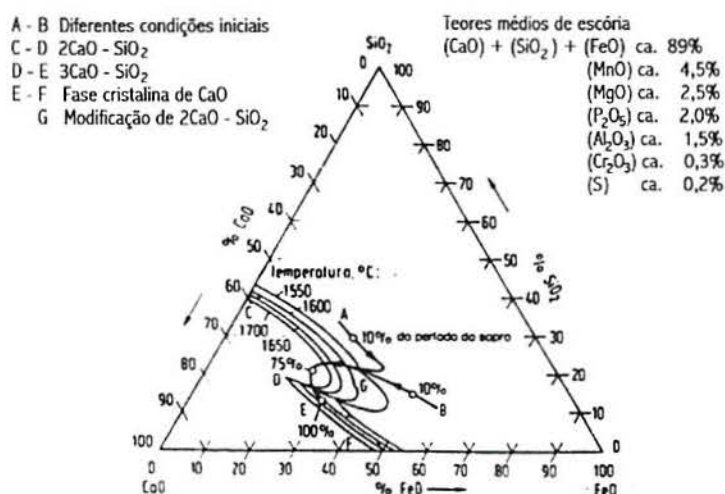


Figura 5.1 Diagrama de equilíbrio ternário de escórias LD (SLAG ATLAS, 1981)

Algumas pesquisas (GEISELER e SCHLOSSER, 1988; MONTGOMERY e WANG, 1991; COOMARASAMY e WALZAK, 1995) têm demonstrado que o efeito do óxido de cálcio livre na instabilidade das escórias depende não somente da quantidade existente, mas também da forma em que se encontra e da dimensão do grão.

O óxido de cálcio livre pode estar sob duas formas nas escórias de aciaria: a pura e em solução sólida com ferro ( $\text{CaO} + x\% \text{FeO}$ , onde  $0 < x < 10$  % em massa). Segundo MONTGOMERY e WANG (1991) elas podem ser distingüidas através de difração de raio-x, onde para o óxido de cálcio puro a distância interlamelar ( $d$ ) é 2,41, enquanto que em solução sólida  $d = 2,38$ .

Para YU-LI e GONG-XIN (1980) altos teores de cálcio, especialmente em solução sólida com pequenas quantidades de ferro, é a causa principal da instabilidade volumétrica das escórias.

GEISELER e SCHLOSSER (1998) através de análise micrográfica identificaram que a cal livre pode apresentar-se sob a forma residual e precipitada. A primeira está relacionada com o consumo de refratário e o grau de desfosforação e a segunda tem sua formação durante a solidificação e resfriamento da escória.

A cal residual, com base na sua dimensão, pode ser dividida em duas categorias: aquela com partículas entre 3 e 10  $\mu\text{m}$ , chamadas de "*grainy lime*" (cal granulosa) e a "*spongy lime*" (cal esponjosa) com partículas principalmente entre 6 e 50  $\mu\text{m}$ . No primeiro caso, apresentam um contorno mais suave indicando dissolução e normalmente são livres de microinclusões. As chamadas partículas "*spongy lime*" (cal esponjosa) são cristais indefinidos, com forma freqüentemente irregular, que formam parte da matriz da escória ocorrendo intersticialmente às fases primárias, especialmente ao  $\text{C}_2\text{S}$ <sup>1</sup>. (GOLDRING and JUCKES, 1997).

A cal precipitada é formada pela transformação, no estado sólido, do silicato tricálcico em silicato bicálcico e óxido de cálcio livre no resfriamento, conforme equação 5.1 (REEVES e LU, 2000):



A cal precipitada normalmente se encontra no contorno dos grãos de  $\text{C}_2\text{S}$  e no interior do  $\text{C}_3\text{S}$ <sup>2</sup>, com partículas de dimensões normalmente inferior a 4  $\mu\text{m}$ . Esta reação ocorre a temperatura de aproximadamente 1250° C no sistema Ca-Si-O (SLAG ATLAS, 1981).

---

<sup>1</sup>  $\text{C}_2\text{S}$ :  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$

<sup>2</sup>  $\text{C}_3\text{S}$ :  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$



Como a cal precipitada sofre influência do resfriamento e composição química, INOUE e SUIITO (1995) sugerem que esta cal pode ser estabilizada através de ferrita cálcica e silicato de cálcio, além da adição de materiais contendo sílica, com injeção de oxigênio. Entretanto, ainda há a presença de quantidade de óxido metálico divalente influenciando o grau de desintegração da cal precipitada.

Segundo GEISELER e SCHLOSSER (1988) o óxido de cálcio livre, sob todas as formas, pode hidratar. Dentre todas, a cal residual chamada de "*spongy lime*", com partículas de dimensões maiores que 50  $\mu\text{m}$ , é a mais significativa de todas.

Esta conclusão deve estar provavelmente associada ao aumento do volume ocasionado pelas reações de hidratação e/ou carbonatação (tabela 5.1). A figura 5.2 ilustra o princípio do processo de desagregação da escória devido ao fenômeno de expansão.

A escória apresenta uma estrutura porosa pela qual migra a água e/ou  $\text{CO}_2$ , os quais vão reagir com o  $\text{CaO}_{\text{livre}}$  existente (5.2a), dando origem a produtos com volume superior ao  $\text{CaO}$ . No caso da hidratação do óxido de cálcio livre, a soma do volume inicial ocupado por este composto e pela água é menor que o produto de hidratação formado, ou seja, hidróxido de cálcio (figura 5.2b). O que pode ser confirmado, por exemplo, ao hidratar-se a cal.

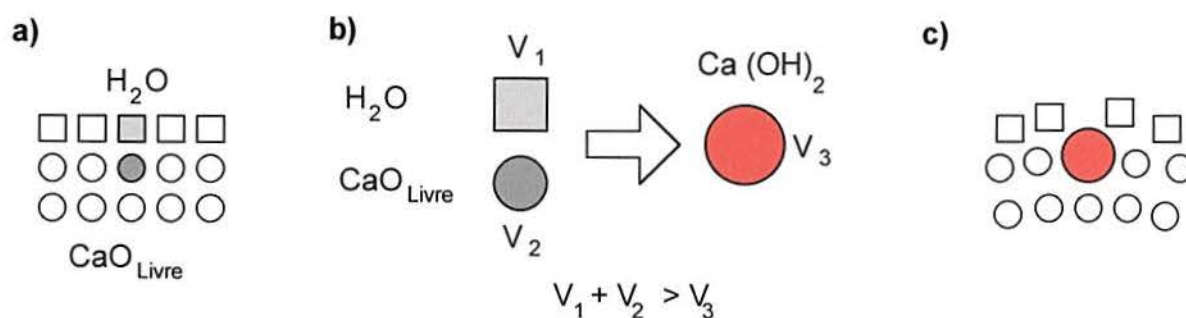
Entretanto, como a escória resfriada lentamente já possui sua estrutura cristalina definida, o produto de hidratação do óxido de cálcio livre tende a ocupar o lugar desse dentro desta estrutura. Se as partículas de  $\text{CaO}_{\text{livre}}$  estivessem soltas, sua hidratação geraria um composto de volume menor que o dos componentes, e não seriam geradas tensões pela troca livre dos espaços ocupados pelos componentes com o produto.

No caso da escória, ao invés de preencher perfeitamente o espaço ocupado pelo  $\text{CaO}$  e pela água, o produto de hidratação tende a ocupar o espaço na rede cristalina anteriormente preenchido somente pelo  $\text{CaO}_{\text{livre}}$  e, tendo maior volume que esta, provoca uma deformação na rede cristalina, gerando tensões de tração que posteriormente irão gerar microfissuração e expansão (5.2c).

**Tabela 5.1** Reações envolvendo o óxido de cálcio

	Reação		
	$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$		
	$CaO$	$H_2O$	$Ca(OH)_2$
	1 g + 0,321g		1,321 g
Massa Molecular (g/mol)	56,08	18,0	74,08
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	3,367	1,0	2,239
Volume Molar (cm <sup>3</sup> /mol)	16,57	18,0	33,09
Volume (cm <sup>3</sup> )	0,297	0,321	0,590
	0,618		
Aumento de volume $CaO \rightarrow Ca(OH)_2$	98,6 %		
	Reação		
	$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3$		
	$Ca(OH)_2$	$CaCO_3$	
		Calcita	Aragonita
Massa Molecular (g/mol)	74,08	100,09	100,09
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,239	2,93	2,71
Volume Molar (cm <sup>3</sup> /mol)	33,09	34,16	36,94
Aumento de volume (%)		Calcita	Aragonita
$Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3$		3,2 %	11,6 %
Aumento de volume (%)		105,0 %	121,6
$CaO \rightarrow CaCO_3$			

Fonte: DAIDO STEEL (1994), WEAST (1984), LIDE (2000)



**Figura 5.2** Processo de desagregação da escória: (a) água em contato com CaO livre presente na escória (b) volume inicial e final dos componentes (d) volume ocupado pelo produto de hidratação na rede cristalina da escória

Segundo THOMAS (1978), em escórias LD, a cal residual representa, em geral, 90%.

Em conversores LD, o volume de cal residual é relacionado com o balanço entre o consumo de refratário e o grau de desfosforação. Com a diminuição do índice de basicidade (< 3,5) e do teor de MgO (< 5,0 %), o aumento do teor de Fe e a relação  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  e adição



de fluorita, associado a uma eficiente agitação, é possível diminuir a quantidade da cal residual (INOUE e SUIITO, 1995).

Existe a tentativa, por alguns autores ( MONTGOMERY e WANG, 1991; KNELLER et al., 1994), de estabelecer um teor máximo de óxido de cálcio livre para garantir a durabilidade do material que incorporará a escória. Esta busca é consequência da dificuldade na determinação do tipo de óxido de cálcio existente, que envolve técnicas mais avançadas de análise, além da alta demanda de tempo para interpretação dos resultados e, sobretudo, da experiência do pesquisador envolvido. Além destes, outro fator a acrescentar é que ainda não é muito definida a correlação dos dados obtidos nos ensaios acelerados e os danos causados na sua aplicação.

Não existe um consenso na literatura em qual seria este teor. O valor mais aceito fica na ordem de 4 a 5 % para o limite superior de óxido de cálcio livre (MONTGOMERY e WANG, 1991).

INTERNATIONAL IRON and STEEL INSTITUTE (1994) sugerem teores da mesma ordem de grandeza, 4,0 %, sendo o emprego liberado para construção de estradas, sem risco de aparecimento de danos, quando o teor for inferior a este limite. Os referidos autores não fizeram nenhuma restrição quanto ao uso.

YU-LI e GONG-XIN (1980) recomendam um teor inferior a 3% para uso na fabricação do cimento.

MOST e GEISELER (2001), citam que na Alemanha experiências têm demonstrado que escórias com óxido de cálcio livre até 7 % podem ser usadas em camadas não confinadas e abaixo de 4 %, para camadas asfálticas.

JUCKERS (1991) apresenta valores máximos de óxido de cálcio livre especificados em vários países, citados por distintos autores: Na Alemanha aceitam-se escórias com teor de  $\text{CaO}_{\text{livre}}$  inferior a 7 %, se maior, é necessário a realização de testes acelerados de expansão. Na Áustria, segundo Koller<sup>3</sup>, escórias com  $\text{CaO}_{\text{livre}}$  entre 10 a 12 % têm se mostrado adequadas, porém como margem de segurança adota-se o limite máximo de 5%. Na Bélgica, com base em inúmeros estudos em rodovias danificadas, que utilizaram escórias, recomendam o limite máximo de 4,5 %, associado a um envelhecimento natural de 1 ano. Sugerem a realização do método de ensaio denominado belga, de avaliação de expansão, como um ensaio adicional a ser realizado.

Porém, KNELLER et al. (1994) recomendam que para aplicação da escória como agregado para base e sub-base em pavimentos rodoviários, o teor máximo seja inferior a

---

<sup>3</sup> KOLLER, W. Erfahrung mit LD – Schlackeim Strassenbau in *Information Day on Utilisation of Blast Furnace and Steelmaking Slags*. Commission of the European Communities, Liege. January 27, Liege.

1%, com vistas a evitar a formação de tufa (depósito poroso de carbonato de cálcio). A sua formação é consequência da reação do hidróxido de cálcio com o ácido carbônico (HURD, 1996). O primeiro decorre do óxido de cálcio livre das escórias e o segundo, do dióxido de carbono da atmosfera somado ao liberado pelos automóveis, que reage com a água da chuva formando o ácido carbônico. A reação entre o hidróxido de cálcio e o ácido carbônico forma o bicarbonato de cálcio ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ), mais solúvel em água que o carbonato de cálcio. Esta solução rica em bicarbonato ocupa orifícios dos drenos do pavimento. Devido a temperaturas altas, a solução evapora-se, o dióxido carbônico vai para atmosfera e ocorre a precipitação e a formação da tufa.

A sequência de equações de 5.2 a 5.5 ilustram este fenômeno (GUPTA et al., 1994).



Segundo GUPTA et al. (1995), esta precipitação é danosa devido à alta aderência no pavimento, evitando a drenagem do pavimento. Segundo o mesmo autor, os parâmetros que controlam a deposição da tufa oriunda dos agregados de escória são o teor de  $\text{CO}_2$ , temperatura, dimensão da partícula do agregado e quantidade de água a que é exposta.

Um parâmetro relacionado ao óxido de cálcio livre é o índice de basicidade.

Basicidade, em geral, expressa a relação entre as concentrações dos óxidos chamados “ácidos” e “básicos” nas escórias. O índice de basicidade simplificado pode ser calculado pelas seguintes relações (CALLEJA, 1982).

$$IB_1 = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \dots IB_2 = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$$

Geralmente chamam-se de escórias ácidas àquelas que apresentam  $IB_1$  ou  $IB_2 < 1$  e básicas àquelas onde existe mais CaO do que  $\text{SiO}_2$ , ou seja, o índice de basicidade superior a 1.

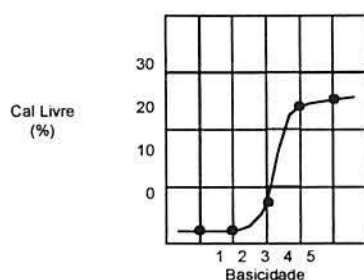
Nas escórias de baixa basicidade, a cal e os óxidos ácidos combinam-se na forma de minerais estáveis. O mesmo não ocorre com escórias de alta basicidade, pois devido a solubilidade do óxido de cálcio, a tendência é, gradualmente, chegar-se à saturação e formar micropartículas da cal, que posteriormente dissolvem-se com pequena quantidade de FeO e então dispersam-se dentro da escória, dando origem ao  $\text{CaO}_{\text{livre}}$ . O  $\text{CaO}_{\text{livre}}$  após a calcinação a  $1700^\circ \text{C}$  e a dissolução com o FeO para a solução, possui uma atividade muito



baixa para hidratação, a qual pode se dar ao longo de um extenso período de tempo (YU-JI e DA-LI, 1983).

A diminuição da basicidade favorece a diminuição destes óxidos (INOUE e SUIITO 1995; MOTZ e GEISELER, 2001). Isto se deve ao fato que, quanto maior o índice de basicidade, maior é a quantidade de silicato tricálcico formado em relação ao silicato bicálcico. Quanto maior a quantidade de silicato tricálcico formada inicialmente, maior a quantidade de óxido de cálcio livre resultante da sua decomposição, conforme mostrado na equação 5.1 (REEVES e LU, 2000).

A figura 5.3 mostra a relação da basicidade da escória com a cal livre



**Figura 5.3** Basicidade da escória em função da cal livre (DAIDO STEEL, 1993)

Segundo MONACO E WU (1994) e REEVES e LU (2000) abaixo de um determinado valor de índice de basicidade, não aparece quantidade inicial significativa de silicato tricálcico e, conseqüentemente, de óxido de cálcio livre. Este valor é de aproximadamente 3,0.

Pelo alto teor de CaO e a presença de  $\beta$   $C_2S$ , a escória de refino redutor tende a expandir mais que a oxidante (SRINIVAS et al., 1987; KAMON et al., 1993).

COOMARASAMY e WALZAK (1995) averigüaram a reatividade superficial das escórias. Estudando escórias de aciaria elétrica e de conversor LD submetidas a umidade relativa entre 90 e 100 % e a 30° C observaram, além da troca da morfologia superficial, a formação de um depósito de cristais espessos sobre a superfície, acompanhado de um aumento da quantidade de cálcio, principalmente de carbonato de cálcio. Como estes cristais são de fácil remoção, a sua presença não é desejável, uma vez que propiciaria uma zona de transição de baixa resistência entre a escória e o carbonato superficial. Segundo estes autores a principal fonte dos depósitos ricos em cálcio são os silicatos de cálcio e com menor influência, a fase de solução sólida com cálcio. Mesmo as escórias com baixo teor de cálcio livre apresentaram reatividade com umidade e expansibilidade.

KAWAMURA et al. (1983) fizeram observações semelhantes. Analisando escórias LD deixadas em exposição ao meio ambiente durante 3 meses, observaram a formação superficial de produtos de hidratação, principalmente de carbonato de cálcio, ora

apresentando forma cúbica, ora com aspecto de flor, variando com o tipo de escória. Também foi encontrado, superficialmente, silicato de cálcio hidratado e carboaluminato hidratado de cálcio. Segundo Asaga<sup>4</sup> apud KAWAMURA et al. (1983) este último composto se forma rapidamente em escórias LD, podendo ser explicado pela exposição à umidade e contato com CO<sub>2</sub> durante a cura. Outras constatações feitas foram que a massa específica decresce, enquanto que a capacidade de absorção cresce. O comportamento destas propriedades é atribuído à formação de uma camada porosa, consequência dos produtos de hidratação na superfície das escórias. Outra alteração que ocorre é a diminuição da quantidade de material passante na peneira 1,2 mm, decorrente dos produtos de hidratação, e da massa unitária, resultante da camada porosa formada.

### 5.1.2 Óxido de Magnésio livre (Periclásio)

O óxido de magnésio, nas escórias de aciaria, existe sob três formas: estado quimicamente combinado, não combinado ou livre<sup>5</sup> e em solução sólida com FeO e MnO. A forma combinada, monticellita, é encontrada nas escórias de aciaria elétrica oxidante, enquanto que nas de refino redutor identifica-se o periclásio MgO<sub>livre</sub>. A solução sólida é observada em todas escórias com exceção das escórias redutoras (SHOUSUN, 1980).

Em escórias de baixa basicidade, além da monticellita, pode-se ter o MgO combinado sob a forma de olivina e mervinita, as quais não apresentam a possibilidade de expansão por hidratação (YU-JI e DA-LI, 1983).

Luo apud MONTGOMERY e WANG (1991) propõe a equação 5.6, como forma de verificar a estabilidade do MgO.

$$I_e = \frac{MgO}{FeO + MnO} \quad (5.6)$$

Para  $I_e < 1$  MgO é estável, ao passo que se  $I_e > 1$  MgO não é estável.

Esta equação está baseada no fato que a variação das dimensões da célula da sua estrutura molecular está vinculada à composição química da solução sólida. Quando o cátion Fe e/ou Mn entrar dentro da solução sólida com cristais de periclásio, há um aumento entre as camadas da célula e ela começa a alargar-se. No caso do inverso, se o cátion Mg, de raio pequeno, entrar na solução sólida com wustita ou manganês, irá ocorrer uma diminuição da célula (SHOUSUN, 1980). Sendo assim, quanto menor o resultado da equação 5.6, maior é a dimensão das células e o espaçamento entre camadas, pois a solução sólida é de ferro ou manganês, na qual o Mg estará combinado e não livre. Quando a relação for maior ou igual a 1, existirá MgO livre e a solução sólida é com periclásio, a qual

<sup>4</sup> ASAGA et al., "Hydration of L.D. Slag", CAJ Review of 35<sup>th</sup> General Meeting, 1981, pp.44-45.



pode gerar instabilidade volumétrica da escória que a contém (SHOUSUN, 1980).

YU-JI e DA-LI (1983) concordam em parte com as equações estabelecidas por LUO (1980), porém não fazem referência em relação ao óxido de manganês. Segundo eles, se o MgO estiver no estado de solução sólida, sua hidratação irá diminuir devido à dissolução de óxidos metálicos divalentes, tais como, FeO. Quando mais que 30 % forem dissolvidos ou quando a quantidade de FeO for superior ao MgO, este óxido será estável.

O teor máximo de MgO preconizado para cimento Portland é de 4,5 %. Um acréscimo de 2,0 % acima deste limite pode gerar o aparecimento de periclásio (TAYLOR, 1997).

A presença do MgO nas escórias pode ser decorrente dos refratários dos fornos que usualmente são de magnésia. A taxa de dissolução deste ainda não é muito bem compreendida, depende da composição química e da porosidade do refratário, bem como das propriedades físicas das escórias e temperatura de operação do forno. Escórias de baixa basicidade têm como resultado uma maior taxa de dissolução do refratário (BYGDÉN et al., 1994).

A hidratação dos óxidos de magnésio não hidratados está associada a um aumento de volume, sendo resultante daí uma das principais causas do problema de expansão das escórias. A tabela 5.2 mostra as reações que podem ocorrer envolvendo o óxido de magnésio e o aumento de volume dos compostos gerados. O óxido de magnésio, por suas reações serem mais lentas, é o responsável pela expansão a longo prazo. Segundo SERSALE (1986) e SHOUSUN (1980), não são todas as formas de óxido de magnésio que são prejudiciais, mas sim aquela em que ele se encontra não combinado ou sob a forma livre, conhecida como periclásio. Esta, após hidratação subsequente irá reagir expansivamente formando  $Mg(OH)_2$ , denominada de brucita (GLASSER, 1990). O processo de desagregação da escória em contato com água, é o mesmo apresentado pela hidratação do óxido de cálcio livre, o qual está ilustrado na figura 5.2.

A escória apresenta uma estrutura porosa pela qual migra a água, a qual vai reagir com o periclásio existente, dando origem a produtos com volume superior ao do  $MgO_{livre}$ . No caso da hidratação do periclásio, a soma do volume inicial ocupado por este composto e pela água é menor que o produto de hidratação formado, ou seja, hidróxido de magnésio.

Entretanto, como a escória resfriada lentamente já possui sua estrutura cristalina definida, o produto de hidratação do óxido de magnésio livre tende a ocupar o lugar desse dentro desta estrutura. Se as partículas de  $MgO_{livre}$  estivessem soltas, sua hidratação

---

<sup>5</sup> Nesta também é incluído parte do refratário que possa estar misturado.

geraria um composto de volume menor que o dos componentes, e não seriam geradas tensões pela troca livre dos espaços ocupados pelos componentes com o produto.

No caso da escória, ao invés de preencher perfeitamente o espaço ocupado pelo MgO e pela água, o produto de hidratação tende a ocupar o espaço na rede cristalina anteriormente preenchido somente pelo MgO<sub>livre</sub> e, tendo maior volume que esta, provoca uma deformação na rede cristalina, gerando tensões de tração que posteriormente irão gerar microfissuração e expansão (5.2c).

**Tabela 5.2** Reações envolvendo o óxido de magnésio

	Reação		
	$MgO + H_2O \rightarrow$		$Mg(OH)_2$
	$MgO$	$H_2O$	$Mg(OH)_2$
	<b>1 g + 0,447 g</b>		<b>1,447 g</b>
Massa Molecular (g/mol)	40,3	18,0	58,3
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	3,58	1,0	2,36
Volume Molar (cm <sup>3</sup> /mol)	11,259		24,716
Volume (cm <sup>3</sup> )	0,279	0,447	0,613
	0,726		
Aumento de volume $MgO \rightarrow Mg(OH)$	119,52 %		

Fonte: DAIDO STEEL (1994), WEAST (1984), LIDE (2000)

### 5.1.3 Silicato dicálcico

O silicato dicálcico também apresenta uma grande importância no fenômeno da instabilidade da escória.

O silicato dicálcico ou ortossilicato de cálcio (2CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>2</sub>S<sup>6</sup>) ocorre sob quatro modificações ( BENSTED et al., 1974; LEE, 1974; LAI et al., 1992; SHARARA et al, 1996):

- α: estrutura trigonal (estável entre 1447°C e 2130°C);
- α'(bredigita): ortorrômbico (estável entre 1147 °C e 830°C);
- β (Iarnita): monoclinico (instável abaixo de 670 °C);
- γ (calco-olivina): ortorrômbico (estável até 830 °C).

A forma α ocorre a temperaturas acima de 1420°C, quando as escórias estão no estado líquido. Com a queda da temperatura e ao atingir 670 °C, o silicato bicálcico transforma-se para forma β que é instável, sendo capaz de alterar-se para a modificação γ.

<sup>6</sup> Nomenclatura da química do cimento: C=CaO; S=SiO<sub>2</sub>



Na forma  $\beta$  o poliedro de coordenação do íon cálcio é irregular e apresenta ligações Ca-O que, por serem mais longas, facilitam a hidratação. A forma  $\gamma$  é pouco hidráulica e inerte. Esta inércia pode ser explicada pela coordenação simétrica do íon cálcio e pela grande força de ligação Ca-O, decorrente da baixa coordenação do cálcio (ABCP, 1984).

A mudança da fase  $\beta$  para  $\gamma$  ocorre porque a energia livre final (forma  $\gamma$ ) é menor que a energia livre inicial (forma  $\beta$ ), indicando que a reação é perfeitamente viável e se verificará espontaneamente nas determinadas temperaturas (CAMPOS FILHO, 1981).

Esta transformação é problemática uma vez que esta transição de  $\beta$  para  $\gamma$  durante o resfriamento ou mesmo a temperaturas ambientes, produz um aumento de volume de cerca de 12%, causando o fenômeno de esfarelamento (LEE, 1974; BENSTED et al., 1974). No início desta transformação há o aparecimento de manchas brancas na escória, e se o silicato estiver presente em grandes quantidades pode ocorrer a desintegração da escória (KIRSCH, 1972). Este aumento de volume está associado ao volume molar muito maior do  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S quando comparado com  $\beta$ -C<sub>2</sub>S (BENSTED, 1974; DAUBE, 1982). A Tabela 5.3 apresenta as diversas modificações do silicato bicálcico.

**Tabela 5.3** Densidade das diversas modificações do silicato bicálcico (DNER, 1988)

Forma	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
$\alpha$	3,03
$\alpha'$	3,31
$\beta$	3,28
$\gamma$	2,97

A presença do C<sub>2</sub>S metaestável justifica a recomendação de uso de escórias de aciaria como agregado, porém não para utilização em concretos estruturais (GUTT, 1972; THOMAS, 1978; EMERY, 1977).

COTIJO (1989) e Parker<sup>7</sup>, conforme LEE (1974), colocam que a quantidade de silicato formado não é significativo quando a quantidade de óxido de cálcio e magnésio, em relação a óxido de silício e alumínio, mantiver-se dentro de certos limites. A norma britânica BS1047 fixa estes valores através das equações 3.7 e 3.8.

$$\text{CaO} + 0,8 \text{MgO} \leq 1,2\text{SiO}_2 + 0,4 \text{Al}_2\text{O}_3 + 1,75\text{S} \quad (5.7)$$

$$\text{CaO} \leq 0,9\text{SiO}_2 + 0,6 \text{Al}_2\text{O}_3 + 1,75\text{S} \quad (5.8)$$

Existe ainda muita divergência em relação à estabilização do silicato, como foi observado por DZIARMAGOWSKI (1992): Suzuki<sup>8</sup> cita que a adição de Fe<sup>3+</sup> e Al<sup>3+</sup>

<sup>7</sup> PARKER, T. W.; RYDER, J. F. Investigations on falling blastfurnace slags. *J. Iron Steel Inst.*, **146**, 127 (1942)

<sup>8</sup> SUZUKI, K.; HURUHASHI, J.; HUKAI, H. *J. Ceram. Soc. Jpn*, 1971, 91. 199-208

estabilizará a forma  $\beta$ , quando introduzido na forma  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . Por outro lado, Gryzmek<sup>9</sup> é da opinião que pequenas concentrações de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  não afetarão na decomposição da fase  $\beta$  e que somente grandes concentrações dificultarão a transformação para a fase  $\gamma$ . Já, para Jeromin et al. a introdução  $\text{Fe}^{3+}$  reduz a estabilidade e a facilidade da transformação de  $\beta$  para a fase  $\gamma$ . Para Guinier e Regourd<sup>10</sup> a transformação para  $\gamma$  ocorre mais prontamente na presença de  $\text{FeO}$ . Para as escórias de aciaria, INSLEY e FRÉCHETT (1955) observaram a estabilização do  $\text{C}_2\text{S}$  devido à presença de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . LAI et al. (1992) afirmam que a estabilização pode ser feita através da substituição  $\text{Si}^{4+}$  por  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{4+}$ .

DZIARMAGOWSKI (1992) observa também a divergência entre autores sobre a influência do  $\text{MgO}$  na estabilização da forma  $\beta$ . Conforme este autor, Schwiete et al.<sup>11</sup> colocam que quantidades menores a 5 % não afetam a transformação, ao contrário do que afirma Kukolew e Mielnik<sup>12</sup> que sugerem que pequenas quantidades aceleram a transformação da forma  $\beta$  para  $\gamma$ .

LAI et al. (1992) atribuem as discrepâncias encontradas pelos diferentes autores quanto à estabilização do  $\text{C}_2\text{S}$  às diferentes condições experimentais dos ensaios.

#### 5.1.4 Óxidos de ferro

As escórias possuem, além de fases não metálicas, uma grande quantidade de partículas ferrosas. No caso das escórias LD, estas são incorporadas no sopro ou durante o próprio vazamento no pote da escória (CRUZ et al., 2000).

Uma das fases mais comumente encontrada nas escórias é a wustita, a qual através de reações de oxidação se transforma em compostos de maior volume, como pode ser visto na tabela 5.4, podendo ser também responsável por parcela da expansão, apesar que, a tendência, devido a altos teores de ferro, é formar uma solução sólida com manganês e magnésio (SERSALE, 1986).

**Tabela 5.4** Reações envolvendo o elemento ferro

	Reações				
	$\text{Fe}$	$\text{FeO}$	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}(\text{OH})$
Massa Molecular (g/mol)	55,85	71,85	88,85	159,69	88,85
Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	7,86	5,70	4,28	5,24	4,28
Volume Molar ( $\text{cm}^3/\text{mol}$ )	7,1	12,6	20,76	30,48	20,76
Aumento de volume (%) em relação do Fe	-	77,46	109,75	328,69	192,39

Fonte: DAIDO STEEL (1994), WEAST (1984), LIDE (2000), MACHADO (2000)

<sup>9</sup> GRZYMEK, J. Cement- Wapno-Gips, 1967, 8, 229-232.

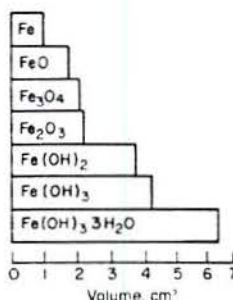
<sup>10</sup> GUINIER, A.; REGOURD, M. In: Proc. 5<sup>th</sup>. Int. Symp. Chemistry of Cement, vol 1, 1-41; 1968, Paris

<sup>11</sup> SCHWIETE, H.; KRONERT, W.; DECKERT, K. Zement-Kalk-Gips, 1968, 9, 359-366.

<sup>12</sup> KUKOLEW, W. G.; MIELNIK, T. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1956, 5, 1012-1014



Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), o aumento de volume devido à transformação do ferro metálico ( $Fe \rightarrow 2e^- + Fe^{2+}$ ) em ferrugem  $FeO.(H_2O)_x$ , pode se dar até 600 por cento do metal original, conforme ilustrado na figura 5.4.



**Figura 5.4** Aumento de volume em função do estado de oxidação (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

MANCIO (2001) analisando o comportamento expansivo de escórias de aciaria elétrica expostas ao ambiente, observou a desagregação de grãos de escórias de diâmetros aproximados 25 mm e 32 mm, decorrente da fissuração originada a partir de pontos contendo alto teor de ferro.

## 5.2 MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DAS ESCÓRIAS

Como a expansibilidade está associada não só à composição química, mas também à composição mineralógica e estrutura interna das escórias, faz-se necessário, antes da sua utilização, a realização de ensaios capazes de estimar a sua expansibilidade.

Neste sentido, encontra-se na bibliografia dois tipos de ensaios: aqueles que avaliam a propriedade da expansão propriamente dita em função do seu uso, ou seja, a variação dimensional causada pela escória, e aqueles que estabelecem limites para os prováveis agentes causadores das manifestações patológicas nas escórias ou nos materiais aos quais são adicionados.

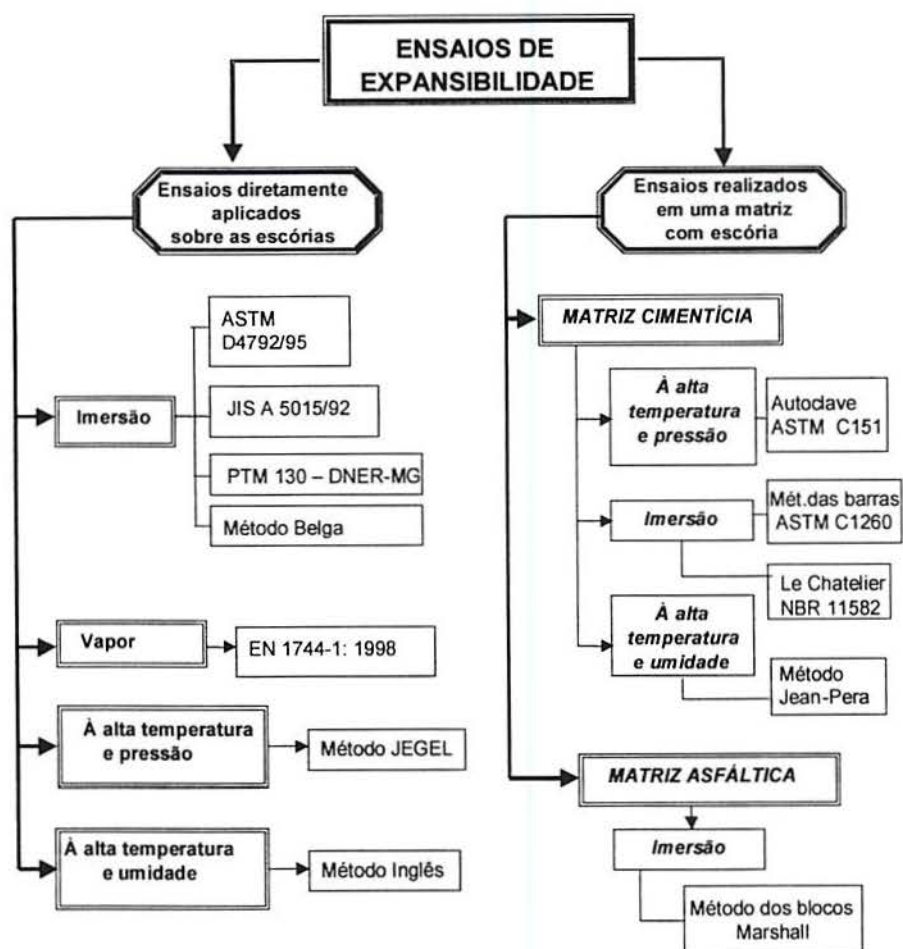
Verifica-se que a grande maioria dos ensaios baseia-se no princípio da hidratação acelerada dos óxidos, entretanto, como apresentado nas tabelas 5.1 e 5.4, não são apenas estas reações que regem o fenômeno de expansão das escórias.

Grande parte dos métodos consagrados para avaliar a expansão desconsideram outros fenômenos, como por exemplo, a oxidação do ferro, que nos ensaios submersos, acontecerá, porém de forma muito lenta, não dando tempo para o fenômeno manifestar-se.

### 5.2.1 Ensaios físicos de avaliação da expansão das escórias de aciaria

Pode-se dizer que são doze os principais ensaios propostos na literatura para avaliar a expansibilidade das escórias de aciaria, sendo que alguns são similares entre si, com pequena variabilidade nos procedimentos de execução.

Estes ensaios podem ser subdivididos em duas categorias, em função da avaliação ser feita diretamente sobre a escória ou não. A figura 5.5 mostra esquematicamente estes ensaios.



**Figura 5.5** Ensaios de expansibilidade aplicados a escórias

#### 5.2.1.1 Ensaios aplicados diretamente sobre as escórias

Todos os ensaios existentes baseiam-se no princípio da aceleração da expansão, que pode ser feito de quatro formas distintas:

##### a. Imersão em água com aumento de temperatura

Neste caso, enquadram-se os ensaios normalizados pela ASTM D 4792/95 – “Method for potential expansion of aggregates from hydration reactions” (Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de agregados a partir de reações de hidratação); norma japonesa JIS A 5015 – 1992 – Escória Siderúrgica para Construção de Estradas. Anexo 2: Método de ensaio de dilatação em água para escória siderúrgica; método de ensaio americano PTM-130 (Pennsylvania Testing Material) -Avaliação do Potencial de Expansão do Agregado Siderúrgico, desenvolvido pelo Departamento de Transportes da Pensilvânia e adaptado pelo Departamento de Estrada de Rodagem de Minas Gerais.



Os ensaios propostos pela norma japonesa (JIS) e americana (ASTM) consistem na moldagem de 3 corpos-de-prova cilíndricos de escória, compactados em três camadas, com a quantidade de água pré-estabelecida em ensaio de determinação de umidade ótima. Posteriormente, são colocados submersos em água à alta temperatura durante determinado período, medindo-se diariamente a variação de comprimento do corpo-de-prova em deflectômetro colocado sobre cada amostra. As normas ASTM e JIS diferem entre si pela distribuição granulométrica da escória a ser ensaiada, duração do ensaio, temperatura da água, energia de compactação e limite máximo estabelecido.

A principal diferença entre estes dois ensaios –ASTM D 4792 e JIS A 5015 - e o proposto pelo Departamento de Transportes da Pensilvânia e adaptado pelo Departamento de Estrada de Rodagem de Minas Gerais reside no fato de que, neste último, cada corpo-de-prova não permanece imerso durante todo o ensaio, e que cada corpo-de-prova possui umidade distinta: um é moldado com umidade próxima à ótima, o outro no ramo seco e o último entre os dois. As adaptações feitas pelo DNER restringem-se à determinação da densidade máxima da amostra, para as quais o DNER – MG adota a especificação DNER-DPT – 49/64 no lugar do PTM 106, conservando porém a mesma energia de compactação empregada na norma americana (CSN, 1988)

Destes três ensaios apenas o preconizado pela norma JIS 5015 estabelece que a escória deva atender a uma curva granulométrica (tabela 5.5).

**Tabela 5.5** Granulometria do material a ser empregado no ensaio de dilatação, conforme norma JIS 5015

# (mm)	26,5	13,2	4,75	2,36	0,425	0,075
% Retida	2,5	27,5	22,7	12,3	15,0	14,0

O enquadramento da escória em uma faixa de distribuição granulométrica contínua é de fundamental importância para a avaliação do potencial de expansibilidade da escória, independente se a mesma encontra-se em dimensões de agregado graúdo ou miúdo. Isto ocorre uma vez que os vazios existentes podem absorver a expansão e as tensões geradas pelo aumento de volume, permitindo o acomodamento dos grãos de escória, podendo a vir mascarar a quantificação da expansibilidade. Resultados obtidos por MANCIO(2001) comprovam esta afirmação. Em ensaios realizados pelo referido autor, para avaliação da expansibilidade através do método preconizado pela ASTM D4792/95, cuja a única limitação é o teor máximo de 10% na peneira 19 mm, a expansibilidade apresentada de uma escória de aciaria elétrica oxidante recém coletada foi praticamente nula. Analisando a mesma escória, submetida ao mesmo ensaio, entretanto enquadrando-a na faixa granulométrica intermediária recomendada pelo DNER, a expansão média obtida aos 7 dias foi de

aproximadamente 0,65%, valor este superior ao 0,5 % limite estabelecido pela ASTM D 2940/92 para uso de escórias em base e sub-base ou pistas de aeroportos.

A tabela 5.6 mostra um comparativo entre os principais parâmetros dos ensaios de imersão.

**Tabela 5.6** Comparativo entre os parâmetros dos ensaios de expansão por imersão

		<b>ASTM D 4792/95</b>	<b>JIS A 5015/92</b>	<b>PTM-130</b>
Compactação	Nº de golpes	3 camadas x 56 golpes	3 camadas x 107 golpes	3 camadas x 56 golpes
	Altura de queda (cm)	30,5	45,0	30,5
Temperatura		70 ± 3	80 ± 3	71 ± 3
Duração		7 dias (ininterruptos)	6 h diárias de aquecimento – 10 dias	7 dias, condição submersa, em estufa 7 dias, saturado (não submerso), em estufa
Limite máximo admissível (%)		< 0,5 (ASTM D 2940/92 – para uso em base e sub-base ou pista de aeroportos)	1,5 a 2,0	3,0 (DNER 263/90)
Distribuição Granulométrica		Limite máx. 10% na # 19mm	Sim	Amostra 1: Passante na peneira # 50,8 mm Amostra Final: Amostra 1 < #19mm.; o retido é substituído por < #19mm e > #4,8mm

O ensaio proposto pela norma japonesa tem sido sensível à expansão da escória. MASUERO (2000) analisou duas escórias oxidantes de aciaria elétrica, uma com idade de 30 meses e outra ensaiada logo após a sua geração. A escória recém gerada, denominada verde<sup>13</sup>, apresentou uma expansibilidade de 4,8 % aos 10 dias, período estabelecido pela norma. Em caráter exploratório, este ensaio foi estendido aos 72 dias. A expansão chegou a 17,7 %. A escória de 30 meses (curada<sup>14</sup>) apresentou uma expansão inicial de 0,5 %, permanecendo neste valor até o final do ensaio.

GUMIERE (2000) também encontrou resultados coerentes ao realizar o ensaio conforme a norma japonesa. Foram estudadas escórias LD geradas no Brasil, com diferentes idades: 3 e 4 meses, 1 e 6,5 anos. Apenas a escória com 4 meses de idade apresentou expansão, 3,25 %, acima do limite estabelecido pela norma. Esta escória apresentava um alto teor de óxido de cálcio livre, 6,4 %.

<sup>13</sup> escória verde: escória recém gerada que já sofreu processo de beneficiamento (recuperação magnética e britagem).

<sup>14</sup> escória curada: denominada toda àquela que, após processo de beneficiamento, sofreu envelhecimento natural ficando exposta a intempéries.



KANDHAL e HOFFMAN (1997) concluíram, em uma investigação sobre a influência da granulometria de uma mesma escória nos resultados de expansão do ensaio PTM 130, que a expansão independe do uso do agregado graúdo ou miúdo, sendo os resultados iguais para ambos.

JUCKES (1991) cita outro método de expansão, denominado de método belga, que baseia-se no ensaio "PTM" e recomendações do departamento de Estradas da Bélgica. Os procedimentos de moldagem são similares ao "PTM", porém os corpos-de-prova ficam submersos em água à temperatura de 80° C. Este método difere dos anteriormente citados pela colocação de uma sobrecarga de 1 a 4,5 kg sobre a amostra.

Em alguns países, tais como, Japão, Bélgica, Alemanha e Estados Unidos (na Pensilvânia) este ensaio é sempre recomendado quando utiliza-se escórias de aciaria, independente do processo, em pavimentação.

#### b. Através da ação do vapor d'água

Outra forma de aceleração da expansão é através do uso de vapor. A norma europeia EN 1744-1:1998 preconiza um ensaio com este princípio, especificamente para escórias de aciaria, com o objetivo de avaliar a expansão decorrente dos óxidos de cálcio e magnésio livres.

Cada corpo-de-prova de escória compactada, com distribuição granulométrica entre 0 e 22 mm (no mínimo dois exemplares por avaliação), é submetido ao fluxo de vapor a 100°C. Na parte superior é colocado um deflectômetro capaz de captar alteração dimensional na amostra.

A duração do ensaio é de 24 horas para escórias LD e 168 horas (7 dias) para escórias de aciaria elétrica e de Siemens- Martins.

MOTZ e GEISELER (2001) sugerem 24h para escória LD com teor de óxido de magnésio inferior a 5,0 %. Para as mesmas escórias com teores superior a 5,0 % e escória de aciaria elétrica o ensaio deve ser de 168 horas, pois a hidratação do óxido de magnésio livre é mais lenta do que a do óxido de cálcio livre.

A proposta de norma N 242 E – "Revisal proposal for draft European Standard for aggregates for bituminous mixtures and surface dressings for roads, airfields and other trafficked areas" estabelece limites de expansão máxima para agregados de escórias de aciaria, com base neste ensaio a vapor estabelecido pela EN 1744-1. Os valores especificados encontram-se na tabela 5.7.

**Tabela 5.7** Máximas expansões admissíveis para agregados de escórias (N 242 E/ 1995)

Tipos de Escória de Aciaria	Expansão máxima (%/volume)	Tempo de ensaio (horas)	Categoria
LD <sup>a</sup> – MgO <sup>c</sup> ≤ 5%	3,5	24	A
LD – MgO > 5% / EA <sup>b</sup>	3,5	168	
LD – MgO ≤ 5%	6,5	24	B
LD – MgO > 5% / EA	6,5	168	
LD – MgO ≤ 5%	10	24	C
LD – MgO > 5% / EA	10	168	
Agregados de aciaria com registro de desempenho satisfatório	Testes para estabilidade volumétrica não são necessários		D

<sup>a</sup>:Escória de conversor a oxigênio LD

<sup>b</sup>:Escória de aciaria elétrica

<sup>c</sup>:Os valores fornecidos pelos produtores de escórias podem ser aceitos para determinação do tempo de ensaio

Na usina japonesa da DAIDO STEEL (1993) comparou-se o ensaio de dilatação em água com o de vapor. Concluiu-se que, para atingir um índice de manifestação da expansão de 90,1 %, índice este definido pela empresa como sendo a proporção da manifestação da expansão ao longo do tempo, necessitaria de 120 dias no ensaio de imersão da JIS 5015 (1992) de dilatação. Enquanto que este valor foi alcançado aos 14 dias no ensaio a vapor.

Para a autora desta tese, este método de ensaio é, dentre todos, o mais apropriado, por avaliar tanto expansões decorrentes da hidratação do óxido de magnésio e cálcio, como também a expansão proveniente da fase metálica, uma vez que a amostra não fica submersa e a alta temperatura acelera as reações de oxidação.

Este ensaio não foi utilizado em virtude da inexistência de infra-estrutura necessária para realização do mesmo.

#### c. Através de alta temperatura e pressão

O ensaio segundo o método JEGEL consiste em preparar uma amostra de escória, a qual é formada por grãos de três diferentes faixas granulométricas: 4,75 a 6,70mm; 6,7 a 9,5 mm e 9,5 mm a 13,2 mm. Cinquenta grãos de escórias são separados para serem submetidos a uma análise petrográfica. Todos os grãos analisados são colocados em autoclave durante 1 hora, com 1 litro de água destilada à 100kPa. Após este período são retirados e analisados novamente petrograficamente, apresentando o percentual de cada faixa fracionada. O limite máximo de partículas fraturadas para cada fração é de 2,0 %.

#### d) Através de alta temperatura e umidade

Jean-Perá propôs um método de avaliação da expansão de escórias através do acompanhamento da perda de massa de argamassas com escórias (GEYER, 2001).

As barras devem ser moldadas e mantidas em cura úmida durante 28 dias, após as



mesmas são submetidas a ciclos de variação térmica. Cada ciclo é composto de cinco dias em imersão e três dias em estufa a 70° C. Antes e após a colocação na estufa, os corpos-de-prova são medidos e pesados com vistas a identificar qualquer variação dimensional ou de massa.

Este ensaio é conhecido por Método Inglês de Expansão (JUCKES, 1991). Consiste em compactar uma amostra de escória, com granulometria de forma a ficar com 60% da dimensão entre 5 e 20mm e 40 % com dimensão inferior a 5mm.

O corpo-de-prova, com peso metálico na parte superior, é colocada em câmara climatizada com temperatura de 80° C e umidade relativa de 90% durante 14 dias.

#### **5.2.1.2 Ensaio realizado em matriz de cimento**

Estes ensaios são preconizados para avaliação do desempenho das escórias em pastas ou argamassas de cimento.

Como materiais cimentícios são materiais frágeis, com baixa resistência aos esforços de tração, a incorporação de escórias a estes mostra-se interessante, do ponto de vista de serem sensíveis a pequenas variações dimensionais e fissurarem caso aconteça.

São três os ensaios para cimento adaptados para escória, o método das barras, o de autoclave e agulhas Le Chatelier.

O primeiro é o método acelerado do National Research Institute da África do Sul, posteriormente normatizado pela ASTM C 1260 (1994), recomendado para avaliação da reação álcali-agregado em argamassas de cimento.

O ensaio consiste em moldar barras de argamassas (2,5 cm X 2,5 cm X 28,5 cm), de traço 1: 2,25, com a areia atendendo as faixas granulométricas estabelecidas, conforme indicadas na tabela 5.8. No caso da avaliação da expansibilidade, a escória pode substituir o agregado miúdo ou o cimento, dependendo da aplicação que será dada à escória. Após 24 horas de cura, as barras são desmoldadas e colocadas submersas em água<sup>15</sup> à 80° C. Realiza-se uma leitura inicial e diariamente avaliado a alteração do comprimento das barras.

---

<sup>15</sup> A norma original recomenda que as barras sejam submersas em solução de hidróxido de cálcio. Como o objetivo é avaliação da expansibilidade decorrente da hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio, alguns autores (MASUERO, 2000; MACHADO, 2000) recomendam a imersão em água pura.

**Tabela 5.8** Frações granulométricas do agregado miúdo para o método das barras (NBR 9783, 1987; ASTM C1260, 1994)

Material retido entre as peneiras (mm)	% Retida
4,8 – 2,4	10
2,4 – 1,2	25
1,2 – 0,6	25
0,6 – 0,3	25
0,3 – 0,15	15

Este ensaio vem se mostrando adequado para avaliação da expansão das escórias. É de fácil realização e os resultados são obtidos em curto período de tempo (MACHADO, 2000; MANCIO, 2001). O único inconveniente é que a contração das barras ao serem tiradas do banho é muita rápida, o que pode gerar certa variabilidade nas leituras (MASUERO, 2000). A respectiva norma prescreve que as leituras sejam feitas em tempo inferior a 15 segundos.

O ensaio de autoclave (ASTM C151/ 1993) recebe severas críticas quanto sua validade para avaliação do potencial expansivo decorrente do óxido de cálcio e magnésio livre. Para LIU et al. (1998) este método é bastante rigoroso para determinação do óxido de cálcio livre, e que a fervura por algumas horas já é o suficiente para desencadear o fenômeno de expansibilidade.

Mehta<sup>16</sup> apud HELMUTH e WEST (1998), critica este ensaio sob 3 aspectos: do ponto de vista econômico, ambiental e técnico. Nos dois primeiros, no que se refere ao elevado consumo energético; e tecnicamente, pela temperatura de 216° C adotada, que considera inaceitável, por achar esta, demasiadamente excessiva.

Os compostos formados decorrentes das condições do ensaio jamais irão se formar sob condições normais de cura (MEHTA, 1999; MOTZ e GEISELER, 2001). Para MEHTA (1999), o limite máximo estabelecido de MgO para os cimentos (< 6,0 % - ASTM C 150) já é suficiente para garantir a estabilidade das pastas, uma vez que, sob condições normais, o MgO permanecerá não hidratado ou hidratar-se-á tão lentamente, que não seria capaz de causar ruptura por expansão.

Como último ensaio, dentro desta característica, têm-se as agulhas Le Chatelier (NBR 11582, 1991).

É um ensaio usado para avaliar a expansão decorrente do excesso de gipsita, no caso do cimento (ensaio a frio) e pelo óxido de cálcio livre (ensaio a quente). A expansão decorrente do periclásio não é praticamente detectada pelo ensaio a quente, dentro das

<sup>16</sup> MEHTA, P. K. History and Status of Performance Tests for Evaluation of Soundness of Cements. Cement Standards-Evaluation and Trends, ASTM STP 663, P. K. Mehta, Ed. ASTM, West Conshohocken, PA, pp.35-60.



condições experimentais (BUCHER et al., 1994).

O ensaio consiste em moldar pastas de cimento em um dispositivo composto de um cilindro (30 mm de diâmetro e 30 mm de altura) e duas hastes (150 mm de comprimento), que no início do ensaio devem permanecer juntas. Após 24 horas de cura em água, temperatura ambiente, metade das agulhas, como são chamados os corpos-de-prova, são deixados em recipiente com água, durante 7 dias – Considerado este como ensaio a frio. O ensaio em água em ebulição consiste em colocar as agulhas em fervura. A partir de 3 horas de fervura, devem ser feitas medidas do afastamento das extremidades das agulhas, a cada 2 horas até que não se verifiquem, em duas medições consecutivas, variações do afastamento das hastes.

Para avaliação da expansão por este método é necessário a moagem da escória em dimensões similares às do cimento, para ter como referência os limites estabelecidos para o cimento.

Este ensaio não mostrou-se adequado para avaliação da expansibilidade de escórias oxidantes de aciaria elétrica, geradas na região sul do Brasil. MASUERO et al. (2000), em ensaios realizados com uma escória de aciaria elétrica, recém gerada, observou no ensaio preconizado pela JIS 5015 uma expansão final em torno de 17 %, enquanto que nas agulhas, a abertura verificada foi de apenas 1,0 mm, estando dentro do limite máximo de 5 mm estabelecido na norma para o cimento (NBR 5732/90).

Para escórias redutoras de aciaria elétrica e para escórias LD, este ensaio deve ser utilizado apenas em caráter exploratório, para verificar-se se a escória apresenta uma alta tendência de expansão ou não. Entretanto GUMIERE (2000) obteve, ao estudar escórias LD geradas no Brasil, uma abertura de agulha de até 27 mm, para o ensaio à quente.

MACHADO (2000) obteve grande variabilidade neste ensaio, porém ao invés de pastas trabalhou com argamassas de traço 1: 2,25 usando a escória como agregado miúdo, com duas distribuições granulométricas – uma semelhante a uma areia grossa (módulo de finura igual a 2,92) e outra a uma areia fina (módulo de finura igual a 1,69). No final do ensaio, após 320 horas, as aberturas das agulhas variaram de 7 a 61,4 mm.

### **5.2.1.3 Ensaios realizados em matriz asfáltica**

O ensaio de expansão a quente de misturas asfálticas é específico para pavimentação.

São moldados quatro blocos de asfalto misturado à quente, dos quais dois são colocados em água a  $60 \pm 1^\circ \text{C}$  e os demais são deixados em temperatura ambiente. Após 72 horas é avaliado a expansão, sendo recomendado que este valor seja inferior a 1 %,

desde que não haja manifestação de fissuras ou desagregação do bloco (STEELMAKING SLAG TECHNICAL COMMITTEE, 1996b).

## **5.2.2 Ensaios de quantificação dos possíveis agentes causadores da expansão das escórias**

### **5.2.2.1 Óxido de cálcio livre**

A quantificação do óxido de cálcio livre consiste basicamente em duas etapas. Uma primeira, onde é feita a extração do  $\text{CaO}_{\text{livre}}$  usando um solvente adequado, através de filtração, e em uma segunda etapa, onde é analisado o conteúdo de cálcio existente no solvente.

A escolha do solvente é fundamental para garantir a completa solução do  $\text{CaO}_{\text{livre}}$  e não reagir com outras fases do óxido de cálcio existentes, tais como  $\text{C}_2\text{S}$  e  $\text{C}_3\text{S}$ . Se o óxido de cálcio estiver em uma solução sólida com alto teor de  $\text{MgO}$  e  $\text{FeO}$ , poderá ser insolúvel, por outro lado, no caso de teores baixos destes óxidos, podem ser dissolvidos juntamente com o óxido de cálcio livre (JUCKES, 1991).

A técnica com extração usando etileno glicol é uma das mais utilizadas (KNELLER et al., 1994) e considerada a mais eficiente (JUCKES, 1991), além de ser simples e rápida (DELIMI et al., 1991).

O etileno é utilizado como solvente seletivo para extrair o  $\text{CaO}$  a altas temperaturas (DELIMI et al., 1991). Entretanto, é fundamental a análise do hidróxido de cálcio.

A norma europeia EN 1744-1: 1998 especifica três tipos de ensaios para a determinação do óxido de cálcio em escórias de aciaria; o método por complexometria, considerado o método de referência e os métodos de conductometria e acidimetria, considerado como alternativos.

Todos os métodos são utilizados para determinação da presença de óxido de cálcio livre e hidróxido de cálcio. Para distinguir em que fases se encontram, devem ser empregadas técnicas adicionais, tais como difração de raio-x e/ou termogravimetria.

O método por complexometria e conductometria baseia-se na extração dos íons de óxido de cálcio livre por etanediol quente, sendo a determinação feita por complexometria, titulação e condutância. Já para o método de acidimetria, a determinação é feita através de etil acetoacetato com titulação do extrato com solução padrão de 0,2 mol/l de solução ácida de hidrocloreídrico.

Os procedimentos de cada metodologia estão especificados na norma em questão.



KNELLER et al. (1994) recomendam termogravimetria associado ao método com etileno glicol anidro (método do açúcar), como uma forma rápida e eficiente para determinação do óxido de cálcio livre. Para MOTZ e GEISELER (2001), o método com etileno glicol é adequado para verificar o óxido de cálcio livre em escórias recém geradas, porém em escórias já envelhecidas, isto não é possível, pois não faz distinção entre o óxido e o hidróxido de cálcio.

ARAÚJO (1997) recomenda um ensaio com luz ultravioleta para verificar a existência de cal livre. Se no ensaio for verificado o aparecimento de muitos pontos amarelos e marrons é porque ocorrerá a desagregação do material quando exposto a intempéries.

#### **5.2.2.2 Determinação do periclásio**

CHUNG (1974) recomenda a determinação do periclásio através da análise de uma amostra padrão em difração de raio-x. A intensidade difratada pelo periclásio dividido pela intensidade difratada da amostra padrão é igual a relação de suas concentrações na mistura, multiplicada por uma constante K obtida pela aplicação do mesmo método a uma mistura de 50% em massa entre as fases (LIMA, 1999).

#### **5.2.2.3 Desintegração do silicato dicálcico**

A EN 1744-1 normalizou o método de determinação da suscetibilidade a desintegração de escórias de alto-forno decorrente da inversão da forma metaestável  $\beta$  para  $\gamma$ . Esta determinação é feita com auxílio de luz ultra-violeta sobre superfície fraturada de escória.

Escórias que exibirem numerosos ou grandes agrupamentos e pequenos pontos com luz brilhante amarela ou bronze em um fundo violeta devem ser consideradas com suspeita de desenvolver desintegração. Quando apresentarem um brilho uniforme em várias tonalidades de violeta com um número limitado de pontos brilhosos e distribuídos uniformemente, devem ser julgadas sãs.

#### **5.2.2.4 Desintegração devido ao ferro**

A EN 1744-1:1998 propõe um método para avaliar a susceptibilidade a desintegração decorrente da hidrólise do sulfeto de ferro, para escórias de alto-forno. A desintegração do ferro ocorre pela exposição ao longo do tempo na atmosfera úmida ou chuva, mas mais rapidamente em água. Na bibliografia consultada, não encontrou-se, para escórias de aciaria, nenhuma citação referente a este ensaio, nem tão pouco manifestação resultante desta origem. Em caráter exploratório, é válido a avaliação das escórias de aciaria quanto a esta propriedade.

Este ensaio consiste em colocar em imersão 30 unidades de escória com dimensão entre 40 e 150 mm durante 2 dias e verificar se ocorrem fissuras ou desintegração.

A norma brasileira NBR 9940 (1987) prescreve um método para avaliação da presença de compostos de ferro em agregados leves para concreto. Neste ensaio é estabelecido um índice de manchamento, como consequência de uma avaliação visual de um papel filtro, após submetidos a procedimentos especificados na referida norma.

### 5.3 ESTABILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS

As escórias podem ser tratadas de duas formas distintas para solucionar o problema de expansão: estabilização da escória no estado sólido e no estado líquido.

#### 5.3.1 Estabilização da escória no estado sólido

No estado sólido, são dois os processos comumente empregados. O primeiro consiste na armazenagem da escória a céu aberto por períodos que variam de três a seis meses, sendo que o último é o de maior consenso (KNELLER, 1994; CHEHEBE, 1986; CSN, 1988). Podem ainda sofrer um resfriamento com pequena quantidade de água. A estabilização por esta técnica não se dá de forma uniforme. Uma vez que os fenômenos que regem a expansão estão ligados à hidratação, carbonatação e oxidação, se as escórias estão submetidas a condições diferentes vão sofrer ou não reações distintas, podendo nem todas as escórias terem suas reações completadas. Além disso, os períodos recomendados na literatura não vinculam o tempo de cura ou armazenagem, à altura das pilhas, distribuição granulométrica e condições de exposição.

Com base nos resultados da avaliação da quantidade de óxido de cálcio livre de escórias LD em função da altura de estocagem das pilhas GUPTA et al. (1995) concluem que o teor de óxido de cálcio livre aumenta com o acréscimo da altura da pilha (tabela 5.9) e que a estocagem nas pilhas não necessariamente remove todo óxido de cálcio livre. A escória avaliada havia sido curada durante 6 meses.

**Tabela 5.9** Percentual de óxido de cálcio livre em função da profundidade da pilha de estocagem de escória (GUPTA et al., 1995)

Profundidade		Óxido de cálcio livre (%)
(pés)	(m)	
0	0,00	0,096
1	0,30	0,185
2	0,61	0,265
3	0,91	0,335
4	1,22	0,388
5	1,52	0,401
6	1,83	0,451
7	2,13	0,579



Segundo REEVES e LU (2000) para climas frios, como por exemplo o Canadá, apenas a cura natural não é suficiente, requerendo-se o uso de água quente e vapor.

Alguns poucos autores fazem algumas considerações a respeito desta estocagem. CONTIJO (1989) recomenda um armazenamento por seis meses, não podendo haver uma variação de temperatura média mensal superior a 5°C neste período. O referido autor não explicitou os critérios para estabelecer as recomendações por ele feitas.

Segundo ABREU (1994), as escórias devem ser colocadas em pilhas de pequenas alturas e serem irrigadas durante seis meses.

A DAIDO STEEL (1993) recomenda, para escória oxidante de aciaria elétrica, o envelhecimento natural durante 6 meses, com mistura das pilhas no segundo e quarto mês e molhagem com sistema sprinkler. Entretanto, para as escórias redutoras, afirmam que este procedimento praticamente não surte nenhum efeito.

A Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente do Rio de Janeiro estabelece uma altura máxima de 4,0 m. Entretanto, esta limitação diz respeito exclusivamente à possibilidade de geração de sólidos em suspensão na atmosfera, sob a ação do vento (SILVA et al., 2000).

A cura à vapor, se mostra bastante adequada como alternativa a este processo, buscando reduzir o tempo de estocagem das escórias, com redução drástica no período de estabilização, de meses a dias, (VIKLUND-WHITE e YE, 1999, OKUMURA, 1993).

Em estudos realizados por YUJI (1986) a condição ótima para tratamento a vapor é entre 1-3 atmosferas de pressão de vapor, por período inferior a 3 horas, é nestas condições que o hidróxido de cálcio atinge suas condições morfológicas normais. Em ensaios complementares realizados pelo mesmo autor, empregando esta escória na fabricação de cimento, apesar do retardo no tempo de pega, houve uma contribuição para hidratação das partículas não hidratadas a mais longas idades.

Segundo HILTUNEN et al. (2000), este tratamento já tem sido utilizado em escala industrial com sucesso, porém o inconveniente é o alto custo do processo.

Para INOUE e SUIITO (1995), o processo de cura a vapor foi o mais efetivo para estabilizar escórias de conversor LD com alta basicidade em um curto período de tempo, pois a taxa de hidratação do óxido de cálcio é maximizada aos 200° C.

DAIDO STEEL (1993) recomendam para escórias de aciaria elétrica redutora este sistema. O processo por eles adotado trabalha com sopro de vapor a 110° C no fundo da pilha de escória em pó, com altura de 3,0 m. Para atingir o limite estabelecido pela norma JIS 5015, o tempo de exposição ao vapor é de 18 dias, porém no procedimento padrão adota-se 20 dias.

### 5.3.2 Estabilização da escória no estado líquido

A intervenção na escória quando ela se encontra ainda no estado fluido tem como objetivo a alteração da composição química e mineralógica da mesma.

Três são as estratégias que podem ser adotadas para estabilização das escórias:

A primeira é a minimização do problema de expansão das escórias, através da diminuição dos óxidos de cálcio e magnésio livres. Isto poderia ser feito, segundo VIKLUND-WHITE e YE (1999), para escórias LD, otimizando o sopro de oxigênio. Além disto, fazer que a cal e a magnésia sejam colocadas o mais cedo possível no processo, para propiciar toda sua queima. Experiências feitas neste sentido já foram realizadas, conseguindo-se obter uma redução de 7,2 % para menos de 1,0 % no óxido de cálcio.

A segunda é obter a estabilização através da colocação de elementos capazes de reduzirem os óxidos instáveis.

SILVA et al. (2000) e MOTZ e GEISELER (2001) sugerem a injeção de oxigênio e a adição de areia. A incorporação de uma adição, como forma de minimizar a quantidade de óxido de cálcio livre, pode ter dois efeitos desejáveis, quais sejam (REEVES e LU, 2000):

- Minimizar a relação  $\frac{CaO}{SiO_2}$  para diminuir a formação de silicato tricálcico, reduzindo a quantidade de óxido de cálcio precipitado;
- reagir com a cal não dissolvida produzindo fases minerais hidráulicas estáveis.

Segundo HILTUNEN et al. (2000), este método já foi implementado em escala industrial na Alemanha.

VIKLUND-WHITE e YE (1999) sugerem, também, a colocação de estabilizadores, tais como sulfatos e boratos, para evitar a desintegração decorrente do  $C_2S$ . E que as escórias que possuem maiores problemas neste sentido são as redutoras e de alta liga. Já as escórias oxidantes de conversor LD já sofrem alguma estabilização devido ao fósforo existente.

CRUZ et al. (2000), através de balanço de massa, determinaram o consumo mínimo de redutores tais como carbono, silício e alumínio para a redução dos óxidos de fósforo, ferro e manganês. Consideraram a redução completa do  $P_2O_5$ , de 1,5 para 0 %, redução do ferro de 28,8 para 3 % e  $MnO$  de 6,11 % para 1%. Obtiveram o consumo de, aproximadamente, 6, 7 e 9 kg/t, respectivamente, de carbono, silício e alumínio. Conseguiram mostrar a viabilidade técnica de obter uma escória com composição química bem próxima do clínquer ou da escória de alto-forno. A cal livre seria estabilizada pelos altos teores de  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$ .



E a última forma para estabilizar a escória é através da alteração do processo de resfriamento. Normalmente a escória de aciaria é deixada resfriar lentamente, disponibilizando tempo para que os cristais se ordenem e endureçam formando compostos cristalinos. Através do resfriamento rápido é possível congelar a estrutura líquida da escória inibindo o crescimento de cristais, entre eles os que podem gerar expansão em água, obtendo-se um material predominantemente amorfo.

A grande vantagem do processo de resfriamento brusco é que além da neutralização das causas de expansão (LUXÁN et al., 2000; VIKLUND-WHITE e YE, 1999), é possível melhorar as características hidráulicas das escórias, agregando um valor adicional (MURPHY et al., 1998).

O processo de resfriamento rápido normalmente é feito com auxílio de água. Entretanto, outro processo que tem sido testado com escórias de aciaria e apresentado resultados positivos é a granulação a seco, resultando em uma escória que pode ser usada como filer ou adição (FEATHERSTONE, 1998).

## **6 PROGRAMA EXPERIMENTAL: PROCESSO DE RESFRIAMENTO BRUSCO DA ESCÓRIA**

O programa experimental foi estabelecido de forma a identificar propriedades físicas, químicas e mineralógicas importantes para a caracterização do fenômeno de expansão das escórias e seus agentes causadores, bem como propor um processo de estabilização dessas escórias.

### **6.1 DEFINIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL E ESTUDOS PRELIMINARES**

O programa experimental foi organizado conforme a figura 6.1, indicando as escórias estudadas e os ensaios realizados.

Com vistas a conhecer o comportamento da incorporação das escórias brasileiras de aciaria elétrica em materiais de construção e na busca de poder contribuir para o entendimento do fenômeno da expansibilidade e definição do programa experimental desta tese, dois estudos preliminares foram realizados.

O primeiro, quanto ao uso da escória (curada) como adição em concretos, os quais encontram-se publicados em MASUERO et al. (1998), MOURA et al. (1999), MASUERO et al. (2000a), MASUERO et al. (2000b) e já comentados nos capítulos anteriores.

E o segundo, quanto ao comportamento, ao longo do tempo, de escórias expostas a diferentes ambientes, através da análise da caracterização físico-químico-mineralógica, buscando identificar os compostos expansivos presentes, a existência de fissuras decorrentes destes, a variação, em termos de massa, dos elementos constituintes das escórias e os constituintes mineralógicos que se formam ao longo do tempo em função do tipo de exposição a que é submetido. Este estudo está relatado na íntegra no Anexo 1.



## PROGRAMA EXPERIMENTAL

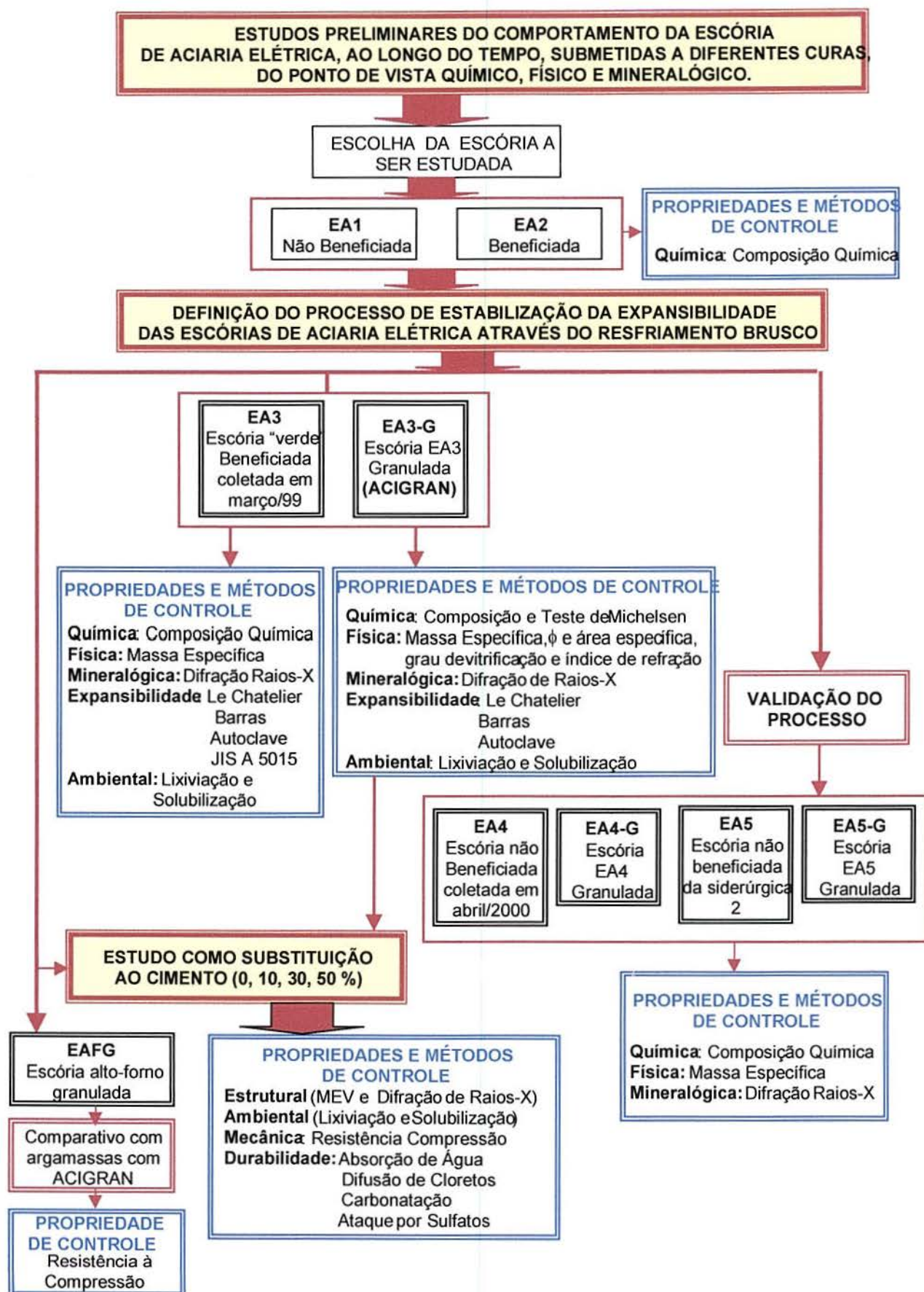
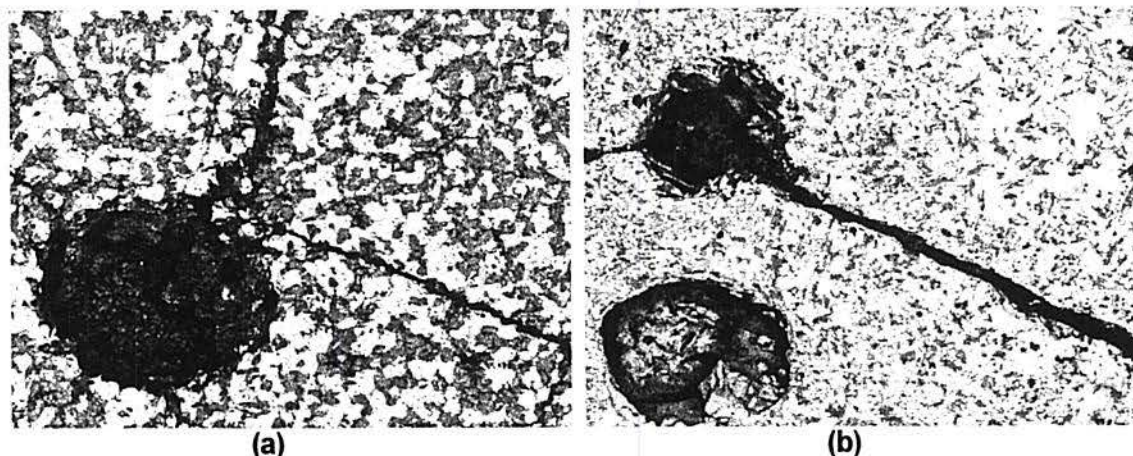


Figura 6. 1 Fluxograma das atividades desenvolvidas no programa experimental

Os resultados obtidos no segundo estudo preliminar realizado mostraram que, em escórias com 3 e 6 meses e 4 anos e 6 meses, ainda existe compostos expansivos, tais como óxido de cálcio, óxido de magnésio (periclásio), larnita e wustita e verifica-se ainda, fissuras internas decorrentes da ação destes, como pode ser visto na figura 6.2.



**Figura 6. 2** Fissuras internas de escórias expostas (a) 3 anos e 6 meses em ambiente natural. Ampliação 120 x (b) 4 anos e 6 meses exposta em cura úmida. Ampliação 75 x

Observou-se influência do tipo de exposição a que a escória é submetida na formação dos compostos mineralógicos existentes, além da alteração nos teores dos óxidos de ferro e silício, ao longo do tempo.

Com base na influência de um grande número de variáveis, como tempo e ambiente de exposição, forma de armazenamento, composição química/mineralógica, granulometria das escórias, que regem o fenômeno da expansibilidade, optou-se pela estabilização da escória através do resfriamento brusco (granulação), o qual além de sanar as causas do fenômeno expansivo, conforme explicitado no capítulo 5, também é vantajoso no sentido de produzir uma escória com propriedades hidráulicas (FEATHERSTONE, 1988; VIKLUND-WHITE, 1999).

Uma vez ajustado o processo de resfriamento brusco, nove escórias foram analisadas. As escórias denominadas de EA1 e EA2 foram estudadas com o objetivo de definir qual tipo de escória de aciaria elétrica, beneficiada ou não, seria utilizada.

Após escolhida qual tipo de escória a ser utilizada, coletou-se uma quantidade suficiente de material para sua caracterização no estado "verde" (EA3) e para a realização de todos os ensaios previstos de avaliação da incorporação da escória granulada ACIGRAN (EA3-G) em argamassas.

As caracterizações da escória verde (EA3) e da escória granulada (ACIGRAN – EA3), foram realizadas objetivando avaliar as alterações causadas pelo resfriamento brusco.



As escórias EA4, EA4-G, EA5 e EA5-G foram utilizadas para validar o processo de resfriamento, tanto para escórias não beneficiadas (EA4), como para escórias de aciaria elétrica de uma segunda siderúrgica (EA5).

E por último, utilizou-se a escória de alto-forno EAFG, com o objetivo de comparar o desempenho mecânico, escolhido como parâmetro de controle, com ACIGRAN, uma vez que em termos de composição química ambas são muito parecidas.

## **6.2 EQUIPAMENTOS E MÉTODOS UTILIZADOS**

Os equipamentos empregados para o preparo das amostras, fusão e caracterização dos materiais estão descritos abaixo:

- Para a fusão da escória foi utilizado um forno mufla, da marca SANCHIS, de revestimento sílico-aluminoso, com temperatura máxima de trabalho de 1450°C;
- a técnica utilizada para determinação da composição química foi fluorescência de raios-x, com uso de equipamento marca PHILIPS, modelo Simultâneo 2600, de 3 giros na superfície da amostra, em um tempo de integração de 30s;
- a análise mineralógica foi realizada através de difração de raios-x, em equipamento marca SIEMENS, modelo D500, radiação  $\text{CuK}\alpha$ , tensão de 36 kV, corrente 20mA, varredura com passo 0,02° 2 $\theta$ ;
- nos ensaios onde foi necessário a moagem das escórias, empregou-se um moinho de bolas, marca SERVITECH, modelo ST242, com jarros de capacidade de 1000ml. A moagem deu-se sempre em quantidades de 500ml;
- a distribuição granulométrica das escórias moídas foi determinada com auxílio de um granulômetro a laser, CILAS, modelo 1064.

## **6.3 ESCOLHA DA ESCÓRIA A SER ESTUDADA E COLETA DA AMOSTRA**

A escória empregada, em todos os experimentos, foi a escória de aciaria elétrica gerada na produção de diferentes aços, com exceção dos aços inoxidáveis, em uma siderúrgica semi-integrada.

A coleta de material para ensaio poderia ser feita antes do beneficiamento a que as escórias são submetidas (resfriamento lento, remoção eletromagnética da fase metálica e britagem, conforme 2.2) ou após o mesmo, mas ainda “verde” (sem praticamente sofrer reações de hidratação, carbonatação ou oxidação no processo de cura).

Objetivando determinar a influência da passagem pelo eletroimã, resolveu-se analisar quimicamente escórias beneficiadas (EA2) e não beneficiadas (EA1), sendo cada uma coletada em uma determinada data. A tabela 6.1 apresenta a composição química das

mesmas.

**Tabela 6.1** Composição química das escórias de aciaria elétrica não beneficiada (EA1) e beneficiada (EA2) <sup>1</sup>

<b>Composição Química</b>	<b>EA1 (%)</b>	<b>EA2 (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	14,66	14,29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,56	4,48
FeO	30,31	31,84
CaO	35,10	33,42
MgO	5,50	5,55
K <sub>2</sub> O	0,06	0,05
Ti O <sub>2</sub>	0,39	0,47
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,11	0,11
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,40	3,02
MnO	3,55	3,89
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,69	0,89
Na <sub>2</sub> O	< 0,001	< 0,001
S	0,09	0,04
<b>Basicidade</b>	<b>2,39</b>	<b>2,34</b>

EA1: Escória de aciaria elétrica não beneficiada

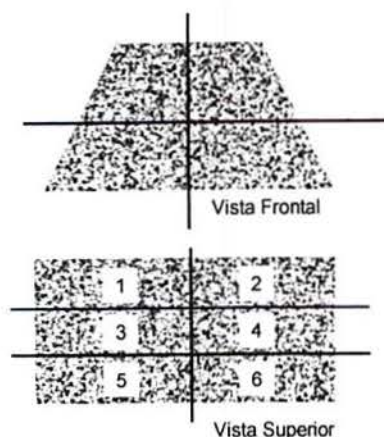
EA2: escória de aciaria elétrica beneficiada

Uma vez que a variação entre a composição química das escórias não é significativa, selecionou-se como escória a ser estudada a que passa pelo processo de britagem, ou seja, beneficiada. Esta escolha permite uma amostragem mais representativa dos materiais, no sentido que em uma única amostra em uma pilha de material coleta-se escórias provenientes de várias carregamentos do forno. Além disso, buscando-se trabalhar com as condições mais adversas em termos de expansão, escolheu-se coletar a escória recém gerada, ou seja "verde", aquela beneficiada que não sofreu o processo de envelhecimento natural por meio da exposição às condições atmosféricas. A escória coletada havia sido gerada há 72 horas, tempo este decorrido entre o resfriamento e britagem da escória.

A amostragem levou em consideração uma divisão virtual da pilha em 6 quadrantes e duas alturas, sendo retiradas amostras de 12 pontos, totalizando, aproximadamente, 200 kg de escória, conforme esquematizado na figura 6.3.

<sup>1</sup> Determinação por análise de fluorescência de raio-x, realizado na indústria siderúrgica, com equipamento especificado no item 6.2.





**Figura 6.3** Representação esquemática dos locais de amostragem da escória

Após coletado o material, o mesmo foi transportado e armazenado em laboratório até a data dos respectivos ensaios.

## 6.4 PROPRIEDADES E MÉTODOS DE CONTROLE DA ESCÓRIA ANTES DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO BRUSCO (EA3)

### 6.4.1 Propriedades físico-químicas

A composição química do material, após sua homogeneização e quarteamento, está apresentada na tabela 6.2. A determinação do óxido de cálcio livre foi feita por dissolução em etileno glicol (NBR 7227, 1982)<sup>2</sup>.

**Tabela 6.2** Caracterização química da escória de aciaria elétrica (EA3)

<b>Composição Química (%)</b>	<b>Escória de Aciaria (EA3)</b>
SiO <sub>2</sub>	16,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,22
Fe O	30,36
CaO	29,81
MgO	7,18
K <sub>2</sub> O	0,04
Ti O <sub>2</sub>	0,43
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,14
MnO	3,14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,46
Na <sub>2</sub> O	< 0,001
S	0,24
CaO livre	0,97
<b>Basicidade</b>	<b>1,85</b>

<sup>2</sup> Ensaio realizado na CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia – Porto Alegre/ RS

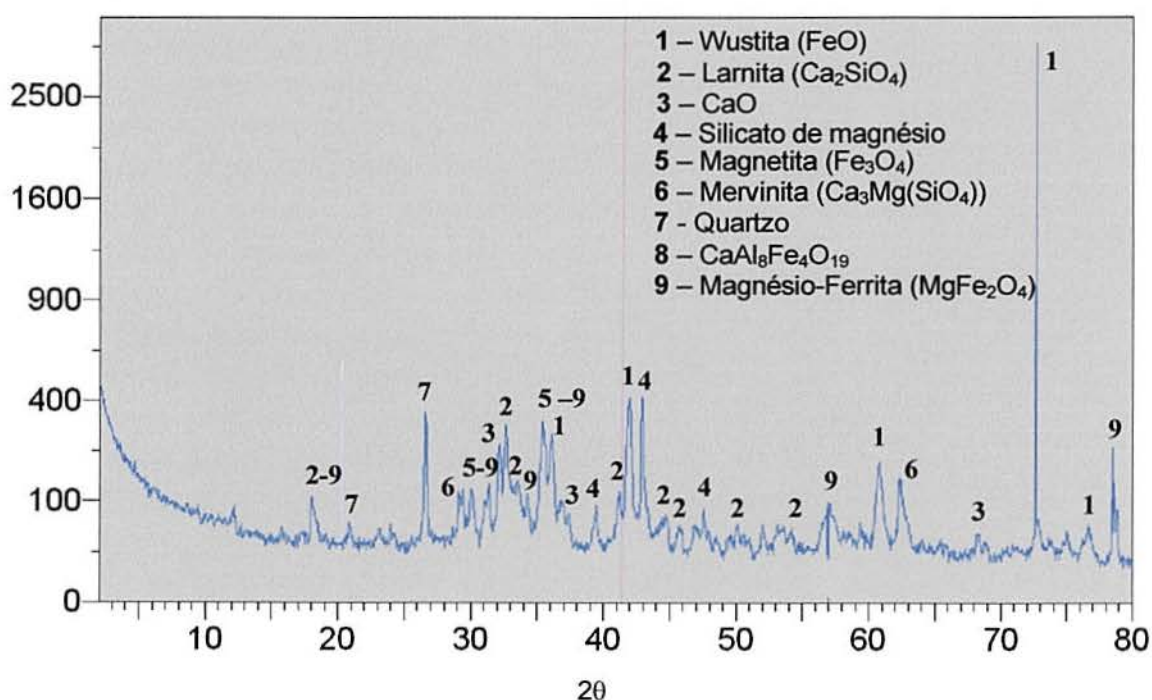
A massa específica da escória é de  $3,47 \text{ g/cm}^3$ , sendo determinada por meio do frasco Chapman ( NBR 9776, 1987).

Para os ensaios de expansão realizados em matriz de cimento, onde a escória (EA3) participa como substituição ao cimento, a escória foi moída em moinho de bolas horizontal durante 60 min e posteriormente peneirada na malha #200 da série normal ABNT (0,075 mm). O diâmetro médio das partículas, determinado através de granulômetro a laser, é de  $4,83 \mu\text{m}$  e sua distribuição granulométrica pode ser vista no anexo 2.

#### 6.4.2 Composição mineralógica

As escórias foram analisadas em termos de seus constituintes mineralógicos com o objetivo de determinar seu grau de cristalinidade, através de difração de raios-x<sup>4</sup>. O resultado obtido está apresentado na figura 6.4.

Intensidade (cps)



**Figura 6. 4** Difratograma de raios-x da escória de aciaria elétrica a ser granulada (EA3)

#### 6.4.3 Expansibilidade

Com vistas a validar a alteração do processo de resfriamento como forma de inibir a expansão, a expansibilidade da escória recém coletada (EA3), foi avaliada através de três métodos: ensaio Le Chatelier (NBR 11582, 1991), ensaio de autoclave (ASTM C151, 1993) e ensaio das barras (ASTM C 1260, 1994).

<sup>3</sup> Ensaio realizado no laboratório de Processamento de Minerais do Centro de Tecnologia - UFRGS

<sup>4</sup> Ensaio realizado no Instituto de Física da UFRGS



Em todos os ensaios de expansão, tanto em corpos-de-prova de pasta como de argamassas, foi adotado uma substituição de 50% em volume com base em discussão técnica e recomendação de MEHTA (1999), segundo a qual, se o material apresentar características expansivas, este teor seria suficiente para o fenômeno se manifestar nos ensaios.

O cimento utilizado em todos os experimentos desta tese foi o CP I – S – 32, cujas propriedades encontram-se na tabela 6.3.

**Tabela 6.3** Propriedades químicas e físicas do cimento<sup>5</sup>

Características Químicas		Propriedades Físicas		
		Expansão a quente (mm)		0,5
SiO <sub>2</sub> (%)	19,79	Tempo de pega (min)	Inicial:	190
			Final:	255
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,25	Blaine m <sup>2</sup> /kg		331
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,60	# 200 (%)		0,90
CaO (%)	62,24	#325 (%)		6,3
MgO (%)	4,32	Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	14,1
SO <sub>3</sub> (%)	2,47		7 dias	27,4
Perda ao Fogo	3,30		28 dias	34,0
CaO livre	2,69		91 dias	41,7
Resíduo Insolúvel	0,52			
Eq. Alcalina	0,70			

Para o ensaio de expansão, métodos das barras, o agregado miúdo empregado foi areia quartzosa proveniente do rio Jacuí/RS, cuja massa específica é de 2,624 (g/cm<sup>3</sup>). A distribuição granulométrica foi composta de forma a atender a respectiva norma do ensaio.

#### 6.4.3.1 Ensaio Le Chatelier (NBR 11582, 1991)

Foram moldadas pastas relação água/ (cimento + escória) = 0,22 (MB 2333, 1991).

A abertura média das agulhas obtida foi de 1,01 mm e 0 mm para os ensaios a quente e a frio, respectivamente, como pode ser visto na tabela 6.4.

**Tabela 6.4** Variação da abertura das agulhas no ensaio Le Chatelier (NBR 11582, 1991)

Agulhas N°	Ensaio a quente			Ensaio a Frio		
	Leitura Inicial (mm)	Leitura Final (mm)	Variação da Abertura (mm)	Leitura Inicial (mm)	Leitura Final (mm)	Variação de Abertura (mm)
1	0	0,94	0,94	0	0	0
2	0,3	1,14	1,11	1,0	1,0	0
3	0	0,98	0,98	0	0	0
Abertura final média (mm)			1,01	Abertura final média (mm)		0

<sup>5</sup> Dados obtidos com o fornecedor

Os resultados obtidos encontram-se dentro do limite máximo especificado para todos os tipos de cimento que é de 5 mm (NBR 5732/1994).

#### **6.4.3.2 Ensaio da Autoclave (ASTM C 151, 1993)**

As barras foram moldadas com traço 1: 2,25, conforme estabelecido pela referida norma. A relação água/(cimento + escória) encontrada, para obtenção de um índice de consistência medido no aparelho de Vicat  $6 \pm 1$  mm (ASTM C187, 1991), foi de 0,23.

Os valores obtidos encontram-se na tabela 6.5

**Tabela 6.5** Expansibilidade da escória medida através do método autoclave

<b>Barras</b>	<b>Leitura Inicial (mm)</b>	<b>Leitura Final (mm)</b>	<b>Expansão* (%)</b>
<b>1</b>	0,1192	304,5	1,96
<b>2</b>	0,0981	304,9	2,10
<b>3</b>	0,1077	3044,7	2,04
<b>Expansão média (%)</b>			<b>2,04</b>

\*: comprimento da barra metálica de referência: 298,5 mm

O valor médio obtido foi 155 vezes superior ao limite máximo (0,8%) admissível pela ASTM C150, para os cimentos do tipo I, II e V, os quais correspondem aos cimentos brasileiros CPI e resistentes a sulfatos.

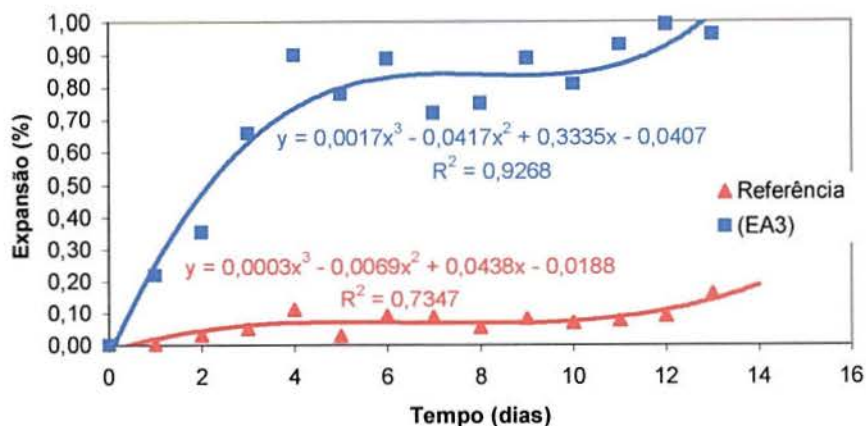
#### **6.4.3.3 Ensaio adaptado das barras (NBRI)**

O ensaio das barras baseou-se no método acelerado National Building Research do Instituto da África do Sul (FURNAS, 1997). As argamassas foram moldadas, conforme NBR 7215 (1996). O traço utilizado foi de 1: 2,25 com a relação água/(cimento+escória) igual a 0,41 (NBR 9773, 1987). A barra considerada como referência foi moldada com cimento CP - I - S - 32 (sem escória).

A adaptação feita em relação ao método original foi a imersão das barras durante o ensaio em água e não em hidróxido de cálcio.

A figura 6.5 mostra os resultados obtidos neste ensaio.





**Figura 6. 5** Expansibilidade da escória verde (EA3) avaliada através do método das barras

Segundo Oberholsten e Davis<sup>6</sup> apud FURNAS (1997), para análise de agregados, pode ser considerado inócuo aqueles cujas barras com eles moldadas apresentar uma expansão máxima de até 0,11% para 12 dias. Em ensaio similar, ASTM C 1260 estabelece um limite máximo de 0,1% para 14 dias de ensaios.

Com base nos resultados obtidos verifica-se que a escória EA3 apresentou uma variação dimensional muito acima dos limites recomendados. O comportamento expansivo da escória era esperado, uma vez que a escória não beneficiada (EA3) é uma escória verde, ou seja, recém gerada, podendo ter a presença de óxido de cálcio livre, periclásio, fase metálica e  $C_2S$ , os quais, como consequência de reações de hidratação, carbonatação e oxidação podem gerar reações expansivas.

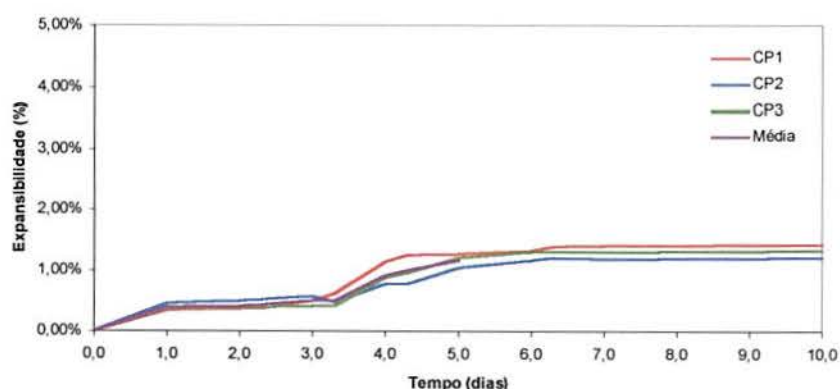
#### 6.4.3.4 Ensaio de dilatação em água para escória siderúrgica (JIS A 5015)

Para moldagem dos corpos-de-prova foi necessário, inicialmente a determinação da umidade ótima, para a qual encontrou-se o valor de 8,95%. Posteriormente, com base na distribuição granulométrica e energia de compactação especificada pela norma JIS A 5015 (1992), moldou-se três corpos-de-prova. As amostras, imersas em água, foram submetidas a 6 horas diárias de aquecimento à temperatura de  $80 \pm 3^\circ C$ , durante dez dias. O tempo de elevação da temperatura e de resfriamento da água foi de 1 hora. A tabela 6.6 e figura 6.6 apresentam os resultados obtidos neste ensaio.

<sup>6</sup> OBERHOLSTER, R. E.; DAVIS, G. An Accelerated Method for Testing the Potential Alkali Reactivity of Siliceous Aggregates, Cement and Concrete Research, 11.34986, vol. 16, pags. 1.31181-189

**Tabela 6.6** Expansibilidade da escória (EA3) medida através do método de ensaio preconizado pela norma JIS A 5015

Tempo (dias)	Variação dimensional acumulada (%)			
	CP1	CP2	CP3	Média
0	0,0	0,0	0,0	0,00
1	0,34	0,46	0,38	0,39
2	0,38	0,50	0,39	0,42
3	0,5	0,58	0,42	0,5
4	1,14	0,78	0,96	0,93
5	1,26	1,04	1,30	1,17
6	1,39	1,20	1,31	1,30
7	1,40	1,19	1,34	1,33
8	1,39	1,25	1,34	1,37
9	1,38	1,39	1,34	1,37
10	1,43	1,44	1,40	1,42



**Figura 6.6** Expansibilidade da escória verde (EA3) avaliada através do ensaio de dilatação preconizado pela JIS A 5015

Observa-se que, a partir dos 4 dias, a variação dimensional praticamente estabiliza-se, atingindo os níveis máximos de aproximadamente 1,4 %. O limite máximo especificado pela referida norma é de 1,5 e 2,0 % dependendo do uso especificado.

#### 6.4.4 Propriedades de importância ambiental

Para estabelecer a qual classe de periculosidade ambiental pertence o resíduo em estudo (NBR 10004, 1987), foram realizados ensaios de lixiviação (NBR 10005, 1987)<sup>7</sup> e solubilidade (NBR 10006, 1987)<sup>7</sup>. O primeiro destina-se a diferenciar os resíduos perigosos

<sup>7</sup> Os ensaios foram realizados pelo Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia - UFRGS.



dos não perigosos, e o segundo, classificar os resíduos em inertes e não inertes. Os resultados encontram-se nas tabelas 6.7 e 6.8.

**Tabela 6.7** Resultados e limites máximos admissíveis do ensaio de lixiviação da escória beneficiada (EA3)

Elementos	LIXIVIAÇÃO	
	Quantidade (mg/l)	Limite máximo (mg/l) NBR10005,1987
Arsênio	< 5	5
Bário	3,3	100,0
Cádmio	< 0,01	0,5
Chumbo	< 0,05	5
Cromo	0,06	5
Fluoreto	2,5	150,0
Mercúrio	<0,5	0,1
Prata	0,2	5,0
Selênio	0,296	1,0
Zinco		5,00

**Tabela 6.8** Resultados e limites máximos admissíveis do ensaio de solubilização da escória beneficiada (EA3)

Elementos	SOLUBILIZAÇÃO	
	Quantidade (mg/l)	Limite máximo (mg/l) NBR 10006,1987
Arsênio	0,005	0,05
Alumínio	3,8	0,20
Bário	<1,0	1,00
Cádmio	<0,001	0,005
Chumbo	<0,05	0,05
Cianeto	0,01	0,10
Cloreto	18,0	250,00
Cobre	0,04	1,0
Cromo	0,03	0,05
Dureza	380,0	500,00
Fenol	0,004	0,001
Ferro	<0,03	0,30
Fluoreto	6,2	1,50
Manganês	0,01	0,10
Mercúrio	< 0,0005	0,001
Nitratos	< 0,1	10,00
Prata	< 0,01	-
Selênio	0,036	-
Sódio	10	200,00
Sulfato	1,2	400,00
Zinco	< 0,01	5,00

Uma vez que a concentração dos elementos considerados como perigosos ou poluentes é inferior ao limite máximo especificado pelo ensaio de lixiviação (NBR 10005, 1987), a escória não é considerada resíduo perigoso. Como foi detectado, no ensaio de solubilização, teores superiores ao máximo permitido para o alumínio, fenol e fluoreto, a escória é considerada “Resíduo Classe II – Não Inerte”.

## 6.5 PROCESSO DE RESFRIAMENTO BRUSCO

A escória a ser resfriada bruscamente em laboratório<sup>8</sup> teve a dimensão de seus grãos diminuída através de um processo de britagem com britador de mandíbulas, para facilitar a fusão e permitir uma maior quantidade de material em cada fusão.

Dois critérios nortearam a escolha do material do cadinho:

- que favorecesse a redução dos óxidos de ferro da escória;
- que não contaminasse a escória com compostos nocivos às propriedades expansivas;

Frente a estas condições, duas possibilidades foram previstas:

- A utilização de um cadinho de grafite de alta pureza (99,9%), que necessitaria ser confeccionado, uma vez que não encontra-se disponível comercialmente;
- a utilização de um cadinho não tão puro (grafite + SiC, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc.), mas existente no mercado.

Optou-se iniciar pela segunda hipótese, pois além destes cadinhos serem encontrados comercialmente, a possível incorporação do silício, um dos elementos de maior teor neste, foi aceita uma vez que o silício é considerado agente formador de cadeias moleculares, reagindo com os óxidos de cálcio, neutralizando a expansão. Além disso, carbono e silício contribuem para redução dos óxidos presentes, como ferro, manganês, fósforo, entre outros. Caso os resultados não se mostrassem favoráveis, a primeira hipótese seria retomada.

Em função do volume interno nominal do forno, a escória foi colocada em cadinhos de 15,0 cm de diâmetro e 30,0 cm de altura de carbetto de silício (figura 6.7), cuja composição química encontra-se na tabela 6.9. A fusão foi feita em lotes de 1 kg.

---

<sup>8</sup> Resfriamento realizado no Laboratório de Siderurgia - LASID/ Centro de Tecnologia - UFRGS





**Figura 6.7** Cadinho de carbeto de silício com escória a ser fundida

**Tabela 6.9** Composição química do cadinho utilizado nas fusões da escória<sup>9</sup>

Composição	(%)
C	$26 \pm 2,0$
SiC + SiO <sub>2</sub>	$48 \pm 3,0$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$1,5 \pm 0,5$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>	$17,0 \pm 1,0$
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$3,5 \pm 1,0$
Álcalis Ferrosos	$4,0 \pm 1,0$

O procedimento consistiu em aquecer o forno até a temperatura de 1450° C. Uma vez atingida esta temperatura, a escória era colocada no cadinho, o qual era posteriormente coberto por uma tampa de grafita, com a único intuito de proteger o forno, e levado a este, onde permanecia durante 50 minutos. A seguir, a escória era retirada e vertida em um tonel de 200 l de água corrente. As figuras 6.8 e 6.9 mostram a seqüência do processo de resfriamento brusco com água realizado em laboratório.

Após a escória ser vertida em água, a mesma era removida e colocada em estufa, a aproximadamente 50° C, até a secagem da amostra. Uma vez seca, passava-se sobre esta um imã, com vistas a remover toda a fase metálica existente na escória, ora aglomerada em grandes pedaços, ora misturada entre os grãos da escória. Foram realizadas 36 fusões de escória, com seu respectivo resfriamento brusco, obtendo-se aproximadamente 25 kg de escória.

Cabe ressaltar que esta quantidade foi determinada em função das limitações do forno e do tempo disponível para elaboração da tese.

<sup>9</sup> Valores informados pelo fornecedor

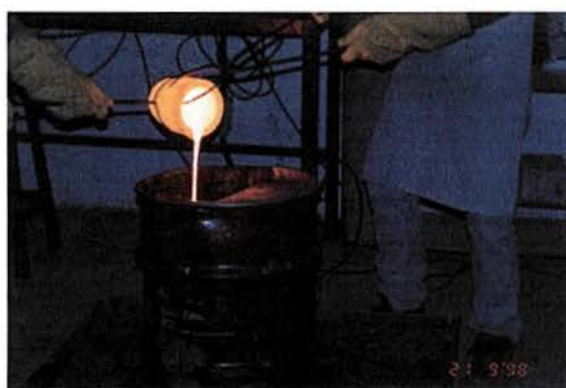


(a)



(b)

**Figura 6. 8** (a) Remoção do cadinho após permanência no forno durante 50 min na temperatura de 1450° C (b) Detalhe do cadinho sendo retirado do forno para ser vertido



(a)



(b)

**Figura 6. 9** (a) Resfriamento brusco da escória em água a temperatura ambiente (b) Detalhe da escória sendo vertida em água

## 6.6 PROPRIEDADES E MÉTODOS DE CONTROLE DA ESCÓRIA (EA3) APÓS O PROCESSO DE RESFRIAMENTO BRUSCO (EA3-G)

O resfriamento brusco em água provocou a granulação da escória, ou seja, partículas de pequenas dimensões. Na sequência do texto, a escória resfriada bruscamente será tratada como escória granulada (EA3-G) ou ACIGRAN.

As figuras 6.10 a 6.12 mostram o aspecto das escórias antes e após ao resfriamento brusco, assim como a fase metálica nitidamente separada pela fusão da escória. Verifica-se que a escória gerada é bem friável.



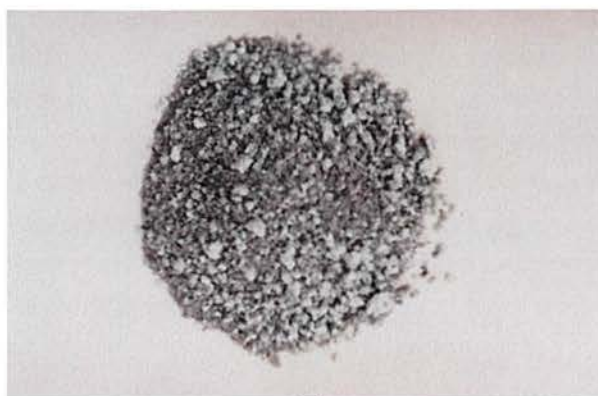


(a)



(b)

**Figura 6. 10** Aspecto da escória (EA3) antes do processo de resfriamento brusco(a) nas dimensões resultantes do atual sistema de beneficiamento (b) finamente moída



(a)



(b)

**Figura 6. 11** Aspecto da escória após processo de resfriamento brusco (EA3-G) (a) na granulometria tal qual gerada (b) finamente moída



**Figura 6. 12** Fase metálica separada durante o processo de resfriamento brusco

### 6.6.1 Propriedades físico-químicas

Analisando-se a composição química da escória granulada mostrada na tabela 6.9, nota-se que houve uma mudança, bastante significativa, de alguns compostos, principalmente o óxido de ferro, devido sua redução por carbono e silício presentes na

composição do cadinho. Visualmente (figura 6.12) já tinha sido verificada uma separação da parte metálica da escória, a qual foi removida através da passagem de um eletroimã.

**Tabela 6.10** Caracterização química das escórias granuladas<sup>10</sup>

<b>Composição Química</b>	<b>Escória de Aciaria antes da granulação (EA3) (%)</b>	<b>Escória de Aciaria ACIGRAN (EA3 – G) (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	16,08	33,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,22	11,50
FeO	30,36	0,81
CaO	29,81	39,42
MgO	7,18	10,78
Na <sub>2</sub> O	0,001	0,001
K <sub>2</sub> O	0,04	0,11
Ti O <sub>2</sub>	0,43	0,76
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,14	0,50
MnO	3,17	3,05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,46	0,01
S	0,24	0,09
<b>Basicidade</b>	<b>0,97</b>	<b>1,19</b>

Obs.: Análise por fluorescência de raios X

Como dito anteriormente, a fase metálica recuperada foi, em média, de 30%. Cabe ressaltar que este valor é bastante elevado, uma vez que esta escória antes de ser granulada já passou por um processo de recuperação de fase metálica, através de eletroimã, na empresa beneficiadora. A separação da fase metálica é consequência do resfriamento brusco e pela redução causada pelo carbono e silício.

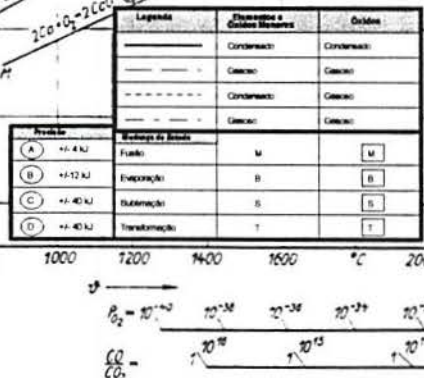
A redução do óxido de ferro pode ser explicada, qualitativamente, pelo diagrama de ELLINGHAM (figura 6.13). Neste diagrama é graficada a variação da energia livre padrão de Gibbs pela temperatura para diversos óxidos metálicos em equilíbrio. Para que uma reação ocorra espontaneamente é necessário que a variação de energia ( $\Delta G^\circ$ ) seja negativa. Sendo assim, no diagrama de ELLINGHAM, quanto mais baixa estiver a linha representativa do óxido considerado, mais estável ele será.

Da mesma forma, para uma mesma temperatura, um determinado elemento opera como redutor sobre todos os compostos cujas linhas representativas estão situadas acima desse elemento.

<sup>10</sup> Determinação por fluorescência de raio-x, realizado na indústria siderúrgica, com equipamento especificado no item 6.2.



representativa do equilíbrio da reação  $2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO$  posiciona-se acima da reta do



**Figura 6. 13** Diagrama de RICHARDSON - ELLINGHAM ( FROHBERG, 1980)

equilíbrio da  $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ . Portanto, nessas condições há a tendência de o carbono reagir com o oxigênio do FeO formando CO, que é mais estável. O que de fato ocorreu também com outros elementos, como por exemplo, fósforo e cromo.

Observando-se a análise química (tabela 6.10), era esperado um aumento percentual dos outros óxidos da escória granulada, decorrente da redução do óxido de ferro. No caso desta corresponder, em média a 30 %, os outros compostos sofreriam um aumento de 1/0,7 (1,43), ou seja, 43 %.

Contudo, para o silício e alumínio, verificou-se um acréscimo superior a este valor. Calculando-se a quantidade de cada elemento químico antes e após a granulação, obteve-se que para cada 1000 g de escória granulada, houve na reação a participação de 33 g de silício e 4,4 g de alumínio (a tabela com o cálculo de todos os elementos encontra-se no anexo 3). Provavelmente, o acréscimo deveu-se ao silício e ao alumínio existentes no cadinho e que também foram incorporados à escória, que é de natureza básico, e, portanto, com capacidade de absorver silício e alumínio.

A massa específica da escória (EA3-G), determinada através de frasco Chapmann (NBR 9776, 1987), é de 2,91 g/cm<sup>3</sup>.

O diâmetro médio da escória após moagem, determinada em um granulômetro a laser<sup>11</sup>, foi de 4,83 µm. A distribuição granulométrica encontra-se no anexo 2. A área específica<sup>12</sup>, determinada pelo método Blaine (NBR NM 76: 1996) foi de 5290 cm<sup>2</sup>/g.

O grau de vitrificação foi determinado pelo método Mac Master. Este consiste em analisar, sob microscópio óptico de luz transmitida, a existência de luminescência, a qual indica a presença de fase cristalina. Quanto mais escura a luminescência, menor será o seu grau de vitrificação e, conseqüentemente, menor será a sua potencialidade hidráulica (SILVA FILHO, 2001). O resultado obtido neste ensaio foi de 98,38 %<sup>12</sup>, valor este considerado bastante elevado. Escórias nacionais de alto-forno apresentam teores de vidro superior a 90%.

O índice de refração, parâmetro diretamente influenciado pela composição química da escória, foi de 1,63, valor este similar ao das escórias de alto-forno nacionais.

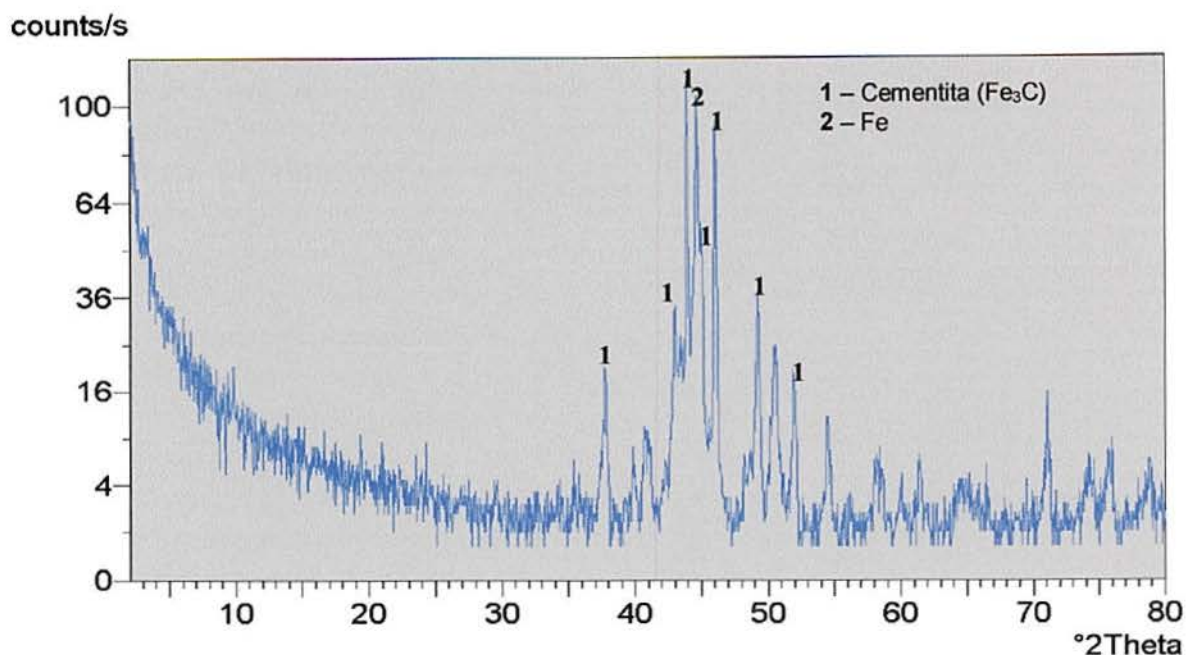
### 6.6.2 Composição mineralógica

A composição mineralógica da fase metálica separada, conforme difratograma visualizado na figura 6.13, mostra o ferro na forma de cementita e ferro puro, sendo assim, um material adequado para retornar ao processo de refino do aço.

<sup>11</sup> Ensaio realizado pelo laboratório de Processamento de Minerais do Centro de Tecnologia - UFRGS

<sup>12</sup> Ensaio realizado pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP – São Paulo/SP





**Figura 6. 14** Difratoograma da raio-x da fase metálica separada da escória<sup>13</sup>

A determinação do óxido de cálcio livre foi realizada através de dissolução em etileno glicol (NBR 7227, 1982)<sup>14</sup>, obtendo-se o valor de 0,05. Valor este muito pequeno, bem inferior a alguns limites máximos sugeridos, 4 a 5 % (MONTGOMERY e WANG, 1991).

A partir das análises químicas, os índices de atividade hidráulica, estabelecidos para estimar a qualidade das escórias com vistas a sua utilização em cimento, conforme descrito no capítulo 4, encontram-se na tabela 6.11.

**Tabela 6.11** Índices de hidraulicidade da escória ACIGRAN

Pesquisador/Norma	Índice	Limites
Blondiau	1,19	1,45 < C/S < 1,54
(CALLEJA, 1982)	2,87	1,8 < S/A < 1,9
Venuat (CALLEJA, 1982)	1,19	1,40 < C/S < 1,45
DIN e Espanha (BATTAGIN, 1986) NBR 5735/91	1,87	$I_H = > 1$ > 1,4 (Japão)
Cheron e Lardinois (CALLEJA, 1982)	1,86	$I_H = > 1,54$
ASTM	1,32	$I_H > 1$
Schwiete (CALLEJA, 1982)	1,2	$I_H = > 1$
Dron (CINCOTTO et al., 1992)	0,22	$R' = > 0,18$

- a. CaO
- b. SiO<sub>2</sub>
- c. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- d. MgO

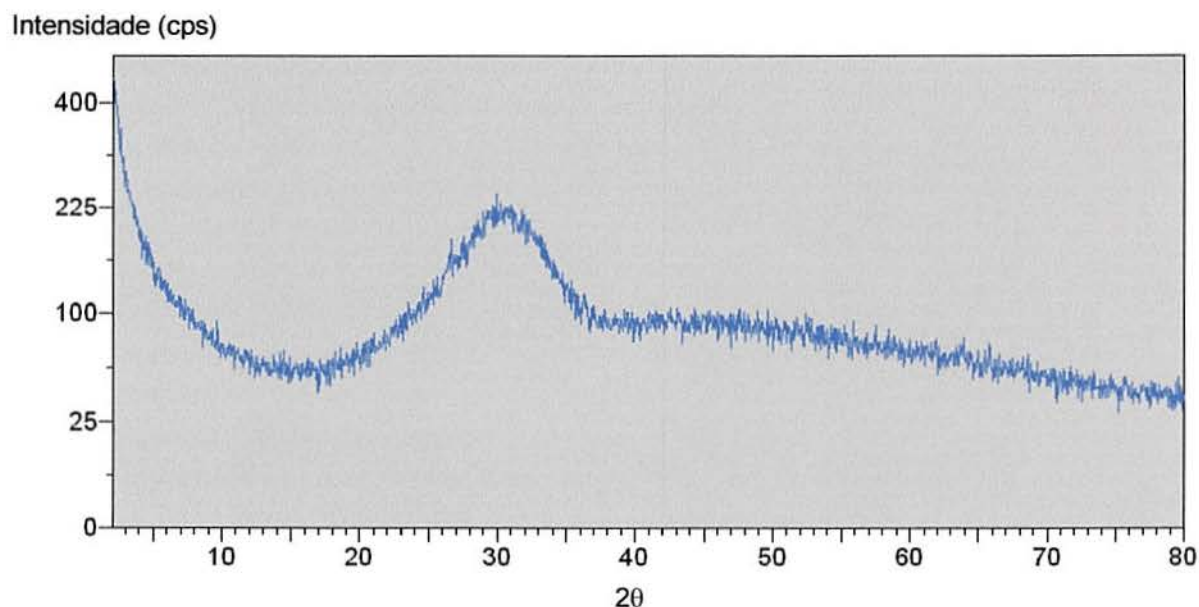
<sup>13</sup> Ensaio realizado pelo Instituto de Física - UFRGS

<sup>14</sup> Ensaio realizado na CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia – Porto Alegre/RS

Com exceção dos índices propostos por Blondiau e Venuat, a ACIGRAN atendeu as demais especificações, inclusive da NBR 5735 (1991).

A reatividade da escória foi calculada através do teste de Michelsen. Este método consiste em determinar, através de microscópio com luz transmitida, o tempo de início de formação de cristais aciculares de gipsita, quando adicionado solução aquosa de sulfato de alumínio à escória (CINCOTTO et al., 1994). O valor encontrado<sup>15</sup> para ACIGRAN foi de 2min:12s, enquanto o referência foi de 2min:49s. Segundo CINCOTTO et al., (1994), para uma escória de boa qualidade este valor varia de 2 a 4 minutos.

A composição mineralógica foi realizada através de difração de raios x<sup>16</sup>. Como pode ser observado na figura 6.15, a escória após processo de granulação passa a ter uma estrutura amorfa.



**Figura 6. 15** Difratograma de raios x da escória após resfriamento brusco (EA3-G)

### 6.6.3 Expansibilidade

Os mesmos ensaios realizados para escória verde (EA3) foram feitos para escória granulada, com exceção ao de imersão – JIS 5015 (1992). Este ensaio não foi realizado por três motivos: a curva granulométrica do material é completamente distinta da preconizada pela respectiva norma, o material é bastante friável, o que levaria a sua desagregação no momento da compactação e por último, a quantidade requerida para o desenvolvimento do ensaio é muito elevada.

Na tabela 6.12, encontram-se os resultados dos ensaios referentes às agulhas Le Chatelier – a quente (NBR 1582, 1991) e ao ensaio de autoclave (ASTM C151, 1993), para

<sup>15</sup> Ensaio realizado pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP - São Paulo/SP

<sup>16</sup> Ensaio realizado no Instituto de Física da UFRGS – Porto Alegre/RS



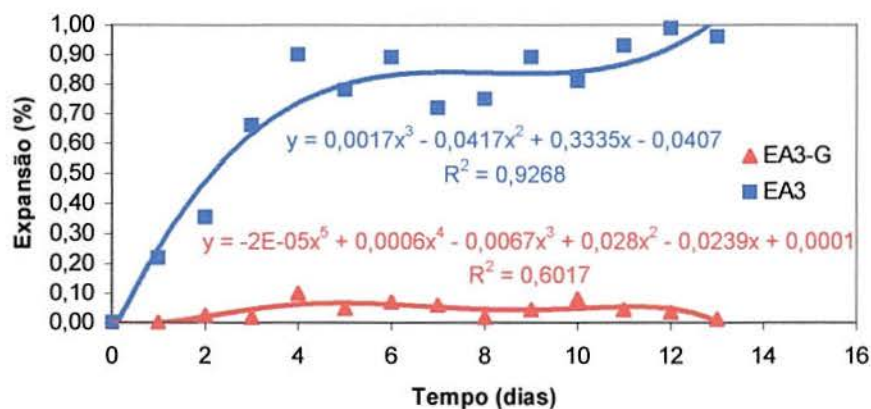
escória ACIGRAN (EA3-G). Verifica-se uma expansão muito pequena, bem inferior ao limites especificados para as referidas normas.

**Tabela 6.12** Resultados da expansibilidade da escória de aciaria granulada avaliada por distintos ensaios

	Ensaio	Água	Expansão Máxima	Limite máx. admissível
		cim + escória		
ACIGRAN	Agulhas Le Chatelier a quente (mm)	0,26	0,1	5
	Ensaio da Autoclave (%) (C151, 1993)		0,0016	0,8

- O teor de substituição foi de 50 %, em volume.

A expansibilidade avaliada pelo método das barras, pode ser visualizada na figura 6.16.



**Figura 6. 16** Expansibilidade da escória ACIGRAN (EA3-G) avaliada através do método das barras

Na figura 6.17 fica evidenciado a redução drástica da expansibilidade das barras quando da substituição da escória verde (EA3) pela ACIGRAN (EA3-G). Os níveis de expansão atingidos ficam na mesma ordem de grandeza aos observados para a barra de referência, ou seja, sem escória (figura 6.5).

#### 6.6.4 Propriedades de importância ambiental

Os resultados dos ensaios de lixiviação (NBR 10005, 1987)<sup>17</sup> e solubilidade (NBR 10006, 1987)<sup>17</sup> podem ser vistos na tabela 6.13 e 6.14.

<sup>17</sup> Os ensaios foram realizados pela Faculdade de Agronomia da UFRGS –Porto Alegre/RS

**Tabela 6.13** – Resultados e limites máximos admissíveis do ensaio de lixiviação da ACIGRAN (EA3-G)

Elementos	LIXIVIAÇÃO	
	Quantidade	Limite máximo (mg/l) NBR10004,1987
Arsênio	< 0,005	5
Bário	1,3	100,0
Cádmio	< 0,01	0,5
Chumbo	< 0,05	5
Cromo	0,03	5
Fluoreto	1,7	150,0
Mercúrio	<0,0005	0,1
Prata	0,02	5,0
Selênio	0,296	1,0
Zinco		5,00

**Tabela 6.14** Resultados e limites máximo admissíveis do ensaio de solubilização da escória ACIGRAN (EA3-G)

Elementos	SOLUBILIZAÇÃO	
	Quantidade	Limite máximo (mg/l) NBR 10004,1987
Arsênio	0,005	0,05
Alumínio	0,55	0,20
Bário	< 1,0	1,00
Cádmio	<0,01	0,005
Chumbo	< 0,05	0,05
Cianeto	0,001	0,10
Cloreto	4,2	250,00
Cobre	0,2	1,0
Cromo	0,08	0,05
Dureza	127	500,00
Fenol	0,004	0,001
Ferro	< 0,03	0,30
Fluoreto	13	1,50
Manganês	0,01	0,10
Mercúrio	<0,0005	0,001
Nitratos	< 0,1	10,00
Prata	< 0,01	-
Selênio	0,019	-
Sódio	6,2	200,00
Sulfato	0,3	400,00
Zinco	< 0,01	5,00

Com base nos resultados obtidos, a escória ACIGRAN pode ser classificada como resíduo Classe II – Não inerte, uma vez que os teores apresentados de alumínio, fenol,



fluoreto, cádmio e cromo foram superiores aos limites máximos preconizados pela NBR 10006, 1987. O cromo superou o limite especificado apenas depois do processo de resfriamento brusco, ou seja na escória granulada (EA3-G) e não na escória verde beneficiada (EA3).

#### 6.6.5 Atividade pozolânica

O ensaio de atividade pozolânica foi escolhido como um indicativo do desempenho mecânico da escória como substituição ao cimento, apesar das escórias de aciaria granuladas não atenderem às especificações da NBR 12653 (1992), quanto à porcentagem mínima de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ser superior a 70%, para as classes N e C e 50 %, para a classe E (escória britada granulada = 45,39 %), para ser considerada material pozolânico.

Entretanto, no caso de desconsiderar a presença do óxido de cálcio da escória ACIGRAN, a porcentagem de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  seria de 74, destes óxidos, sendo considerada, pela respectiva norma, como materiais de composição química adequada.

Além da crítica existente em relação a que, este teor mínimo não apresenta relação direta com as propriedades do material, e por considerar que o material encontra-se necessariamente em fase totalmente amorfa, o que muitas vezes não ocorre (LEA, 1970), esta especificação não contempla os materiais cimentantes, como as escórias de alto-forno granulada, ou àqueles que são cimentantes e pozolânicos, como as cinzas volante com elevado teor de cálcio, desconsiderando o efeito benéfico proporcionado pela existência de maiores teores de óxido de cálcio (MEHTA e MALHOTRA, 1996).

Para realização dos ensaios, a escória foi homogeneizada e moída em moinho de bolas horizontal<sup>18</sup>, com jarros de capacidade de 1000 ml. A escória foi moída sempre em quantidades de 500 gr .

Após a moagem, por um tempo de 40 min, a escória foi peneirada na malha # 200 (0,075mm). O material passante foi novamente colocado a moer, por mais 30 minutos. Este procedimento foi estabelecido em função de ensaios preliminares com a escória de aciaria granulada. Inicialmente, a escória foi moída no mesmo tempo inicial, de 40min, e após, simplesmente peneirada. O teor retido na peneira 45  $\mu\text{m}$  foi 56%. Como um dos testes preliminares que seriam executados era o de atividade pozolânica com cimento (NBR 5753, 1991), onde necessitava-se que a moagem atendesse às exigência da referida norma de no máximo 34% de material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$  (NBR 12653, 1992), optou-se por moer por mais 30 minutos.

<sup>18</sup> Equipamento especificado em 6.2

Com vistas a homogeneidade em termos de granulometria, foi mantido constante, além do tempo, a quantidade de escória e de bolas, usando-se 500g e 780g, respectivamente.

A atividade pozzolânica com o cimento foi estabelecida pelo método físico NBR 5752, 1992) e método químico (NBR 5753, 1991).

#### **6.6.5.1 Avaliação da atividade pozzolânica da ACIGRAN (EA3-G) com cimento – método físico**

Este método prescreve que o índice de atividade pozzolânica é estabelecido a partir da relação, expressa em porcentagem, entre as médias de resistência à compressão aos 28 dias dos corpos-de prova moldados de argamassa com material pozzolânico, e dos corpos-de-prova de argamassa moldados com cimento Portland (referência).

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de dimensões (5 x 10) cm de argamassa de cimento e agregado miúdo (argamassa referência) e de argamassa com 35% do volume de cimento substituído pela escória de aciaria granulada.

O cimento empregado para a moldagem dos corpos-de-prova foi cimento Portland comum-CP 1-S, conforme anteriormente especificado na tabela 6.5 e areia normal brasileira (NBR 7214, 1982) comercializada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT.

A água requerida, assim como o índice de atividade pozzolânica com cimento, encontram-se na tabela 6.15.

**Tabela 6.15** Índice de atividade pozzolânica da escória de aciaria granulada com cimento

	<b>Argamassa Referência</b>	<b>Argamassa com ACIGRAN*</b>	<b>Especificações NBR 12653(1992)</b>
$\frac{\text{Água}}{\text{cim} + \text{escória}}$	0,50	0,48	-
Consistência (mm)	227	230	225±5
Água Requerida (%)	100	94	< 110
Resistência Média aos 28 dias (MPa)	26,7	31,8	-
Desvio Padrão (MPa)	4,79	3,83	-
Índice de atividade pozzolânica (%)	100	119	≥ 75

\*35 % de substituição de cimento por escória ACIGRAN (EA3-G)

Verifica-se que a quantidade de água requerida, para uma mesma consistência, para as argamassas com ACIGRAN é menor do que a de referência. Este comportamento é o mesmo apresentado quando emprega-se escórias de alto-forno. Segundo NAGATAKI



(1994) este comportamento é consequência da rugosidade superficial e forma das partículas. O índice de atividade pozolânica é bastante elevado quando comparado com o de outras adições (BARATA, 1998).

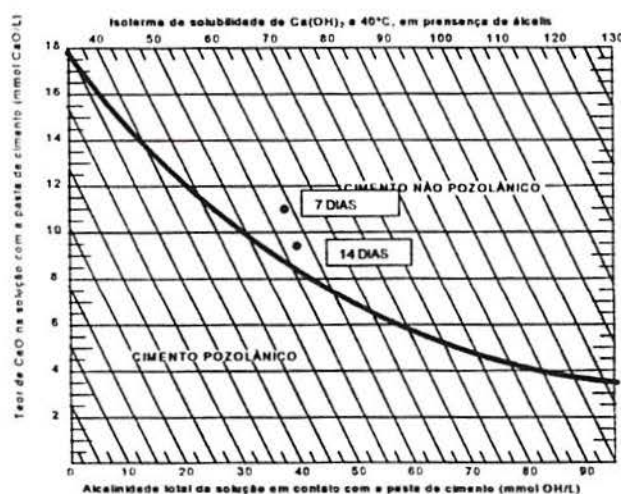
#### 6.6.5.2 Avaliação da atividade pozolânica da ACIGRAN (EA3-G) com cimento – método químico

O método químico baseia-se no princípio que o hidróxido de cálcio é fixado pela pozolana, logo, quanto maior a pozolanicidade, menor a quantidade resultante de hidróxido de cálcio (NEVILLE, 1997).

A atividade pozolânica<sup>19</sup> ( NBR 5753, 1992) é calculada pelo inverso da distância entre o ponto no gráfico e a origem das coordenadas, multiplicado por 100. Quanto maior este índice, maior a atividade pozolânica da mistura. Desta forma, os pontos posicionados mais próximos à origem, implicam em um maior consumo de hidróxido de cálcio e menor alcalinidade (ISAIA, 1995).

Este ensaio é realizado aos 7 dias, caso não apresente atividade pozolânica a esta idade, ensaia-se aos 14 dias.

A figura 6.17 apresenta o diagrama de pozolanicidade, mostrando o teor de CaO em função da alcalinidade total.



**Figura 6. 17** Índice de atividade pozolânica da ACIGRAN determinado pelo método químico (NBR 5753,1991)

Desta forma, atividade pozolânica da ACIGRAN (EA3-G), pelo método químico (figura 6.17), não é confirmada, ao contrário do obtido pelo método físico.

<sup>19</sup> Ensaio realizado pela Associação Brasileira de Cimento Portland –ABCP – São Paulo/SP

Críticas são feitas a este ensaio por Massazza<sup>20</sup> (1977), Takemoto e Uchikawa<sup>21</sup> apud MEHTA (1987) por não existir relação entre os resultados obtidos pelo ensaio químico e o ensaio de resistência à compressão de argamassas, uma vez que este último é diretamente associado à microestrutura da pasta hidratada, podendo dois materiais pozolânicos com similar capacidade de fixação de óxido de cálcio, não apresentar a mesma microestrutura (Regourd et al.<sup>22</sup> apud MEHTA, 1980).

Sendo assim, como a escória foi considerada material pozolânico pelo método físico, o resultado deste ensaio (método químico) não será utilizado como parâmetro de avaliação de desempenho.

## **6.7 VALIDAÇÃO DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO BRUSCO: RESFRIAMENTO DA ESCÓRIA ANTES DO BENEFICIAMENTO (EA4) E DA ESCÓRIA DE UMA OUTRA SIDERÚRGICA (EA5)**

Objetivando validar o método de resfriamento, realizou-se o resfriamento brusco de uma escória antes do processo de britagem, ou seja, que não passou pelo eletroimã e não foi retirado fase metálica da escória (EA4).

Da mesma forma, testou-se também a granulação com a escória de outra siderúrgica (EA5) que opera com forno elétrico. Por questões de validação da hipótese de amostragem feita anteriormente, optou-se por coletar amostra da escória não beneficiada.

A tabela 6.16 apresenta a composição química destas escórias antes (EA4 e EA5) e após (EA4-G e EA5-G) o processo de granulação e, para fins comparativos, das escórias EA3 e EA3-G. Verifica-se que em todas as escórias, independente da siderúrgica e de ter sofrido beneficiamento ou não, houve a redução do ferro. Da mesma forma que para ACIGRAN (EA3-G), ocorreu um aumento dos teores, principalmente, de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , para as demais escórias granuladas.

As figuras 6.18 e 6.19 apresentam os difratogramas das escórias (EA4, EA4-G, EA5 e EA5-G), onde observa-se que, com a alteração do processo de resfriamento, não houve tempo para as moléculas se arranjam de forma ordenada, dando origem à estrutura amorfa. Na escória granulada não beneficiada (EA4-G), resultante de apenas 4 fusões, observou-se um pico cristalino, identificado como monticelita.

<sup>20</sup> MASSAZZA, F. Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements. Proceedings, *Sixth International Symposium on Chemistry of Cements*; Moscow; 1974

<sup>21</sup> Takemoto, K.; Uchikawa, H. Hydration of pozzolanic cements; Proceedings, *Seventh International Congress on Chemistry of Cement*; Paris. 1980

<sup>22</sup> REGOURD, M.; MONTUREUX, B.; GAUTIER, E. Hydraulic reactivity of various pozzolans; *Fifth International Symp. On Concrete Technology*; Univ. of Neuvo Leon, Mexico; pp. 1-14; 1981.



**Tabela 6.16** Composição química das escórias, antes e após o processo de granulação

	EA3 (%)	EA3 – G(%)	EA4 (%)	EA4 – G(%)	EA5 (%)	EA5 – G(%)
SiO <sub>2</sub>	16,08	33,077	14,08	33,50	20,61	34,29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,22	11,50	4,40	8,42	5,74	10,64
FeO	30,36	0,81	33,02	0,57	27,62	1,23
CaO	29,81	39,42	33,93	45,34	27,88	33,51
MgO	7,18	10,78	4,38	8,30	8,84	13,38
K <sub>2</sub> O	0,04	0,11	0,03	0,06	0,07	0,09
Ti O <sub>2</sub>	0,43	0,76	0,51	0,79	0,80	1,13
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,05	0,12	0,05	0,09	0,05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,14	0,49	3,23	0,40	1,64	0,27
MnO	3,17	3,05	3,98	2,90	4,90	3,40
Pb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,46	0,01	0,90	0,01	0,62	0,00
S	0,24	0,09	0,04	0,06	0,03	0,06
Na <sub>2</sub> O	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
<b>Basicidade</b>	1,85	1,19	2,41	1,35	1,35	0,98

EA3: Escória “verde” beneficiada coletada em março de 1999

EA3-G: Escória EA3 granulada

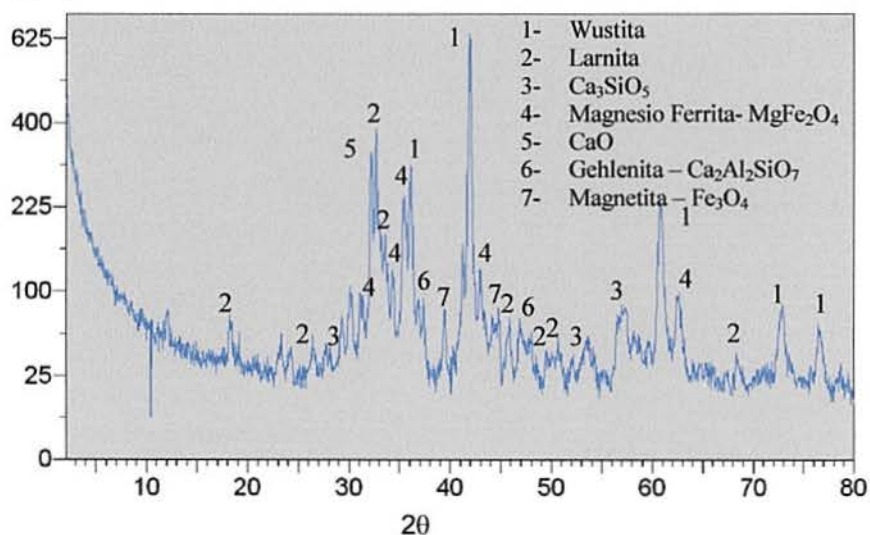
EA4: Escória “verde” não beneficiada coletada em abril/2000

EA4-G: Escória EA4 granulada

EA5: Escória “verde” não beneficiada da siderúrgica 2

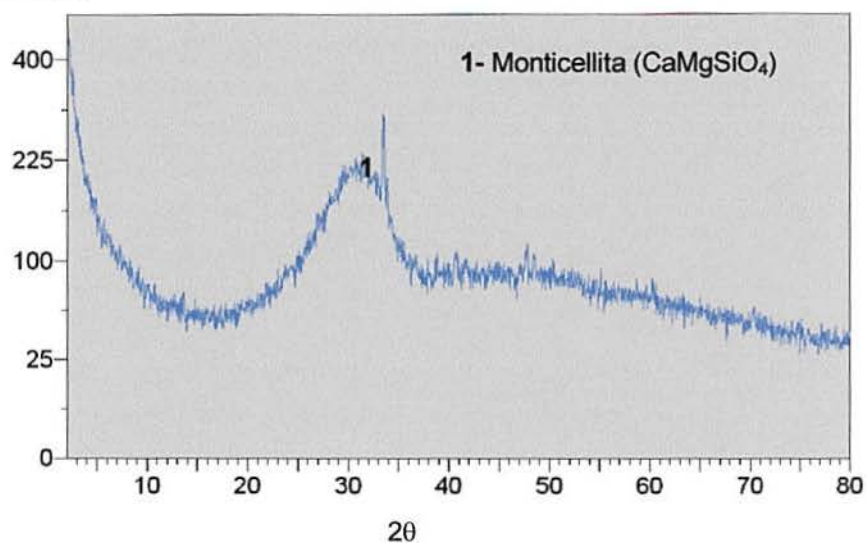
EA5-G: Escória EA5 granulada

Intensidade (cps)



(a)

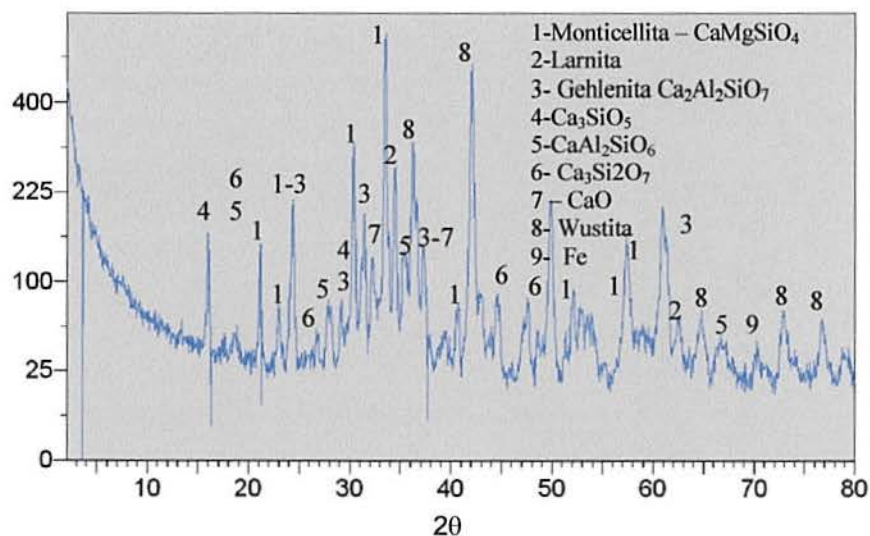
Intensidade (cps)



(b)

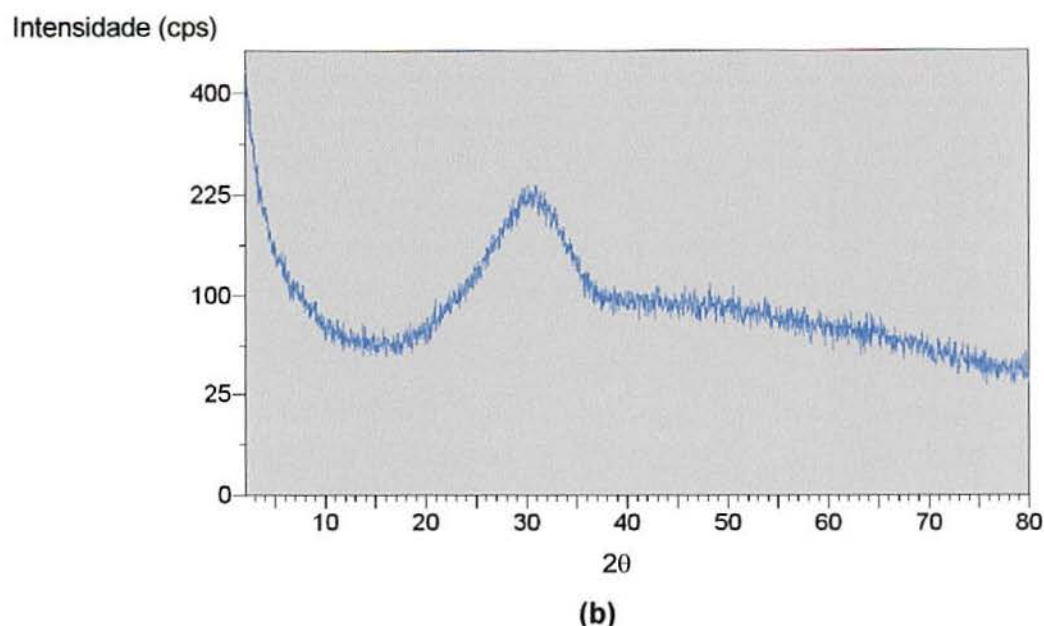
**Figura 6. 18** Difratoograma de raios-x da escória com fase metálica (a) antes do resfriamento brusco (EA4) (b) após o resfriamento brusco (EA4 – G)

Intensidade (cps)



(a)





**Figura 6.19** Difratograma de raios-x da escória com fase metálica da siderúrgica 2 (a) antes do resfriamento brusco (EA5) (b) após o resfriamento brusco (EA5 - G)

As composições químicas das escórias de aciaria elétrica granuladas encontradas ficam dentro da mesma faixa de composição das escórias de alto-forno granuladas destinadas à indústria de cimento, com exceção do óxido de magnésio e manganês, que apresentam valores ligeiramente superiores. A tabela 6.17 apresenta as composições químicas típicas para escórias de alto-forno, comparando-as com as obtidas nas escórias granuladas (EA3-G, EA4-G e EA5-G).

**Tabela 6.17** Composição química de escórias de aciaria e alto-forno granuladas

	Escória de alto-forno (CINCOTTO et al., 1992)		Escória de aciaria elétrica granulada
	teores indicados na literatura (%)	escórias brasileiras (%)	Granuladas em laboratório (%)
SiO <sub>2</sub>	23 – 55	30 – 35	33 – 34
CaO	27 – 55	40 – 45	34 – 45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 – 25	11 – 18	8 – 12
MgO	2 – 12	2,5 – 9	8 – 13
MnO	0,5 – 3	-	3 – 3,5
FeO	0,5 – 2	0 – 2	0,6 – 1,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0 – 2	
S	0,4 – 1,2	0,5 – 1,5	0,06 – 0,09

As massas específicas destas escórias encontram-se na tabela 6.18. Observa-se uma redução das mesmas para as escórias granuladas. Este fato está associado a separação da fase metálica ao resfriar-se bruscamente as escórias.

**Tabela 6.18** Massas Específicas (NBR 9776, 1987) das escórias

Escória	EA3	EA3-G	EA4	EA4-G	EA5	EA5-G
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	3,47	2,90	3,82	2,96	3,70	2,91

EA3: Escória “verde” beneficiada coletada em março de 1999

EA3-G: Escória EA3 granulada

EA4: Escória “verde” não beneficiada coletada em abril/2000

EA4-G: Escória EA4 granulada

EA5: Escória “verde” não beneficiada da siderúrgica 2

EA5-G: Escória EA5 granulada

Para verificar a existência ou não de diferenças no comportamento das argamassas ou pastas com cimento em relação à expansibilidade e resistência mecânica, decorrentes de uma possível diferença de composição química, foram testadas as duas escórias granuladas, àquelas cuja origem é antes (EA4-G) e após (EA3-G) o processo de beneficiamento.

### 6.7.1 Expansibilidade

Na tabela 6.19, encontram-se os resultados dos ensaios referentes às agulhas Le Chatelier (NBR 1582, 1991) e ao ensaio de autoclave (ASTM C151, 1993), para escória ACIGRAN e para escória não beneficiada granulada (EA4-G). Da mesma forma que a ACIGRAN (EA3-G), verifica-se uma expansão muito pequena para a escória não beneficiada (EA4-G), bem inferior aos limites especificados para as referidas normas. Comprovando-se novamente, que o processo de beneficiamento não influencia o processo de granulação.

**Tabela 6.19** Resultados da expansibilidade da escória de aciaria granulada avaliada por distintos ensaios

	Ensaio	Água	Expansão Máxima	Limite máx. admissível
		cim + escória		
ACIGRAN	Agulhas Le Chatelier (mm)	0,26	0,1	5
	Ensaio da Autoclave (%) (C151, 1993)		0,0016	0,8
EA4 - G	Agulhas Le Chatelier (mm)	0,24	0,2	5
	Ensaio da Autoclave (%) (C151, 1993)		0,0012	0,8

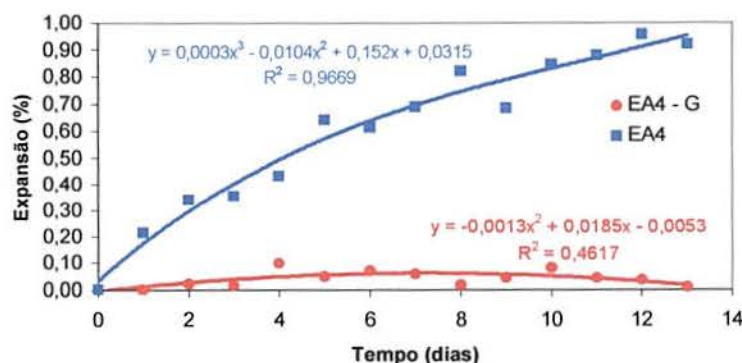
- O teor de substituição foi de 50 %, em volume.

A figura 6.20 ilustra a expansibilidade avaliada pelo método das barras para a escória EA4-G.

Houve uma redução significativa, na ordem de 90 %, das expansões ao longo do tempo, passando de 0,9 % de expansão para as escórias sem resfriamento (EA4), para



menos de 1,0 % para as escórias granuladas (EA4-G), mostrando-se assim a eficácia do método de resfriamento brusco para sanar os problemas de expansão.



**Figura 6. 20** Expansibilidade da escória EA4-G avaliada através do método das barras

### 6.7.2 Avaliação da atividade pozzolânica com cimento

Este ensaio foi escolhido como parâmetro de validação, mesmo a ACIGRAN não tendo apresentado atividade pozzolânica pelo método químico, para verificar se o bom desempenho neste ensaio (alto índice de atividade pozzolânica=119%) e a capacidade de aumentar a plasticidade, reduzindo a relação água/aglomerante, mantém-se independente da origem da escória a ser granulada.

Para verificar se o bom desempenho neste ensaio mantém-se independente da origem da escória.

A água requerida, assim como o índice de atividade pozzolânica com cimento, da argamassa com EA4-G, encontram-se na tabela 6.20. Para efeitos comparativos estão apresentados os valores para ACIGRAN.

**Tabela 6.20** Índice de atividade pozzolânica da escória de aciaria granulada com cimento

	Argamassa Referência	Argamassa com ACIGRAN*	Argamassa com EA4-G**	Especificações NBR 12653(1992)
$\frac{\text{Água}}{\text{cim} + \text{escória}}$	0,50	0,48	0,48	
Consistência (mm)	227	230	225	225±5
Água Requerida*** (%)	100	94	94	< 110
Resistência Média aos 28 dias (MPa)	26,7	31,8	27,7	
Desvio Padrão (MPa)	4,79	3,83	3,80	
Índice de atividade pozzolânica (%)	100	119	104	≥ 75

\*35 % de substituição de cimento por escória ACIGRAN

\*\*35 % de substituição de cimento por escória EA4-G

A diferença nos valores de atividade pozolânica entre as duas escórias é provavelmente decorrente da distribuição granulométrica.

Da mesma forma que a ACIGRAN, a incorporação da EA4-G reduziu a quantidade de água requerida, podendo este efeito estar relacionado com a forma e rugosidade superficial das partículas.

## **6.8 CONCLUSÕES**

O processo de resfriamento mostrou-se um método eficaz para separação da fase metálica existente na escória, recuperando na ordem de 30%, em massa.

A nova escória (fase não metálica) gerada apresenta características hidráulicas. Com base nos resultados dos ensaios mecânicos, da análise química, ambiental e microestrutural pode-se dizer que o uso deste material é potencialmente viável.

A composição química obtida após a granulação é similar à da escória de alto-forno, ficando dentro da faixa das escórias geradas no país.

Não foi observado influência do maior ou menor teor da quantidade de fase metálica decorrente da britagem ou não, na escória granulada gerada. Da mesma forma, conseguiu-se validar o processo de granulação para escória gerada em uma segunda siderúrgica.

Nos capítulos que se seguem serão avaliadas uma série de propriedades ligadas ao desempenho mecânico e de durabilidade, com vistas a estabelecer o comportamento de argamassas com esta nova escória.

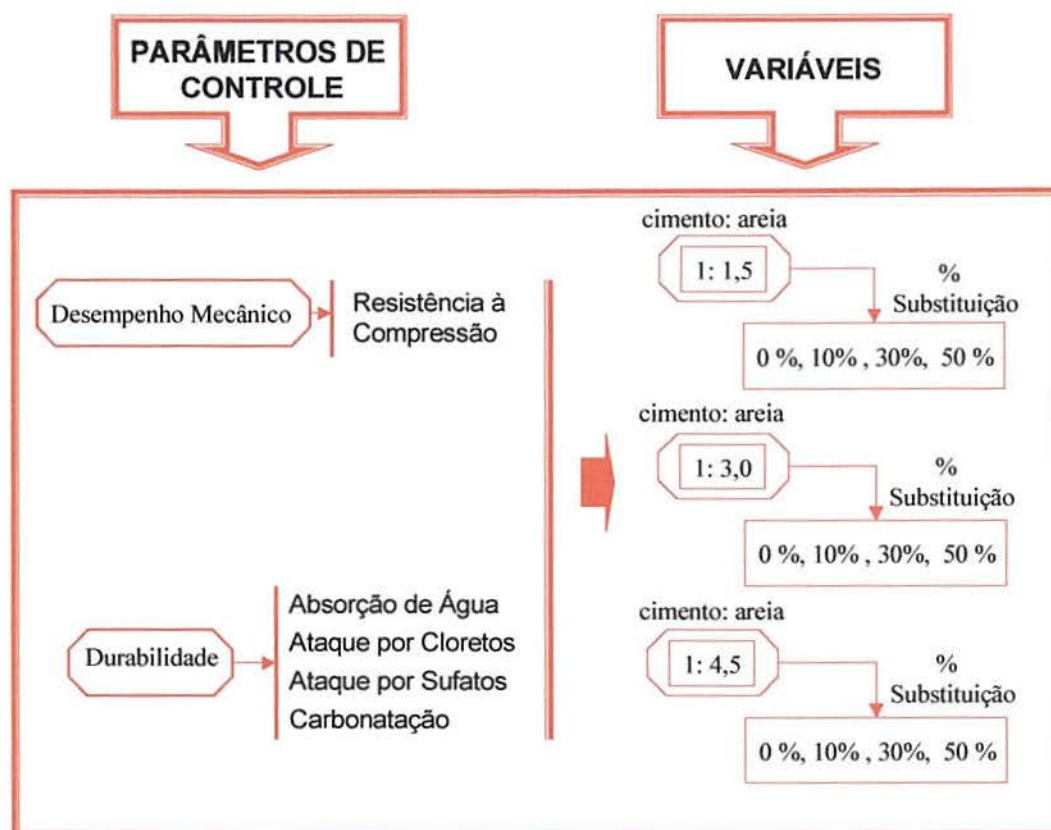


## 7 VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA GRANULADA COMO SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO

Com base nos resultados positivos obtidos nos ensaios de caracterização da escória de aciaria elétrica granulada (ACIGRAN – EA3-G): composição química, difração de raios-x, teste de Michelsen, grau de vitrificação, ensaio de atividade pozolânica e de expansibilidade, que apontam para um potencial uso como substituição ao cimento ao mesmo tempo que não apresentam nenhuma restrição, foram desenvolvidos ensaios para verificar a influência do teor de substituição tanto no desempenho mecânico, como nos aspectos ligados à durabilidade das argamassas.

Em virtude da limitação da pequena quantidade de escórias de aciaria granulada disponível, os ensaios foram restritos a argamassas e não a concretos como era a proposta inicial do trabalho. Entretanto, como o comportamento de ambas, na maioria das propriedades, apontam a mesma tendência, é possível extrapolar os resultados e prever o comportamento das propriedades estudadas para o concreto (LEBER e BLAKEY, 1956).

Os ensaios realizados estão sintetizados na figura 7.1.



**Figura 7.1** Propriedades avaliadas nas argamassas com escória de aciaria granulada (ACIGRAN – EA3-G)

## **7.1 MATERIAIS EMPREGADOS**

As argamassas foram confeccionadas com cimento, agregado miúdo e escória de aciaria elétrica granulada (EA3-G), denominada de ACIGRAN.

### **7.1.1 Cimento**

O cimento empregado foi cimento Portland Comum (CPI S), classe 32. Este cimento foi escolhido em função de apresentar um baixo teor de adição ( $\leq 5,0\%$ ) e não possuir finura excessiva, o que poderia mascarar a influência da presença da escória granulada.

As características químicas e físicas deste cimento foram apresentadas na tabela 6.5., no capítulo anterior.

### **7.1.2 Agregado Miúdo**

O agregado miúdo utilizado foi a areia normal brasileira composta por quatro frações, conforme (NBR 7214, 1990).

### **7.1.3 Escória de Aciaria Elétrica Granulada (ACIGRAN)**

A escória usada como substituição ao cimento foi obtida conforme procedimentos explicitados no item 6.4, os quais consistiram, basicamente, na moagem em moinho horizontal, por um tempo de 40 min, o seu posterior peneiramento na malha # 200 (0,075mm) e a remoagem do material passante por mais 40 minutos. O diâmetro médio da ACIGRAN, conforme descrito no item 6.6.1, é 4,83  $\mu\text{m}$  e sua distribuição granulométrica encontra-se no anexo 2.

O material antes do seu emprego foi homogeneizado.

Uma vez que as composições químicas e mineralógicas da escória de aciaria granulada ficaram muito próximas às da escória de alto-forno, resolveu-se fazer uma avaliação comparativa entre as duas, apenas do ponto de vista de resistência à compressão em argamassas. Em ambas foram utilizados os mesmos teores de substituição.

A escória de alto-forno utilizada apresenta uma massa específica de 2,91  $\text{kg/dm}^3$  (NBR 9776/1987), ao passo que a da ACIGRAN é de 2,90  $\text{kg/dm}^3$ .

### **7.1.4 Escória de alto-forno**

Foi empregada uma escória granulada de alto-forno a coque, fornecida por uma siderúrgica brasileira, cuja composição química está apresentada na tabela 7.1. O uso desta escória limitou-se na confecção de corpos-de-prova para avaliação da resistência à compressão.



**Tabela 7.1** Composição química da escória de alto-forno (EAF-G)<sup>1</sup>

<b>Composição Química</b>	<b>EAFG (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	35,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,65
FeO	0,24
CaO	42,25
MgO	6,96
Na <sub>2</sub> O	0,14
K <sub>2</sub> O	0,43
Ti O <sub>2</sub>	0,48
MnO	0,95
S	0,78
<b>Basicidade</b>	2,39

## 7.2 PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS

A avaliação das propriedades das argamassas com escória de aciaria granulada (ACIGRAN) foi feita em três traços, 1:1,5, 1:3,0 e 1: 4,5 (cimento: areia).

A escória foi utilizada em substituição ao cimento, em volume, nos teores de 0, 10, 30 e 50 %.

Para a escolha dos teores, levou-se em consideração a quantidade disponível de material para a realização dos ensaios e uma faixa de variação que permitisse identificar a influência de pequenas a grandes quantidades. Como limite inferior foi escolhido o teor de 10 %, pelo fato de quando incorporado algumas adições neste teor, proporciona-se a melhoria de algumas propriedades (MALHOTRA et al., 1992; SILVEIRA, 1996 ).

Como teor máximo, inicialmente, havia-se escolhido 70 %, com base no limite máximo estabelecido para adição em cimento CP III (NBR 5735 /1991). Entretanto, em função da quantidade limitada de material, este valor foi descartado. Como substituição máxima adotou-se o teor de 50 %, por ser considerado um elevado valor de substituição. E 30% como valor médio aos extremos.

A argamassa de referência é aquela sem escória ( 0%).

O índice de consistência (NBR 7215, 1996) foi escolhido como parâmetro de controle. O valor adotado foi de  $260 \pm 10$  mm, determinado na mesa de consistência ("flow table"), por ser usualmente empregado nas pesquisas.

<sup>1</sup> Composição química fornecida pela siderúrgica.

### 7.3 DESEMPENHO MECÂNICO: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O desempenho mecânico foi avaliado através da resistência à compressão axial dos corpos-de-prova de argamassa, uma vez que esta propriedade é empregada como principal parâmetro para definir e caracterizar as argamassas e concretos. As idades avaliadas foram 7, 28 e 91 dias.

#### 7.3.1 Quantidade de Materiais

As tabelas 7.2 a 7.4 mostram a quantidade de materiais utilizada para moldagem de corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão, para os três traços avaliados a diferentes idades para argamassas com ACIGRAN e com escórias de alto-forno.

A substituição de cimento por escória foi feita em volume.

**Tabela 7.2** Quantidade de materiais necessária para moldagem de argamassas com ACIGRAN e escória de alto-forno (EAF-G), traço 1: 1,5

TRAÇO	Teor (%)	Escória ACIGRAN			
		Areia = 1500 g			
		Relação $\frac{a}{c+e}$	Cimento (g)	Escória (g)	Água (g)
	0	0,33	1000	0,0	330,0
	10	0,32	900	93,3	317,9
	30	0,31	700	279,4	303,6
1: 1,5	Teor (%)	Escória ALTO-FORNO			
		Areia = 1500 g			
		Relação $\frac{a}{c+e}$	Cimento (g)	Escória (g)	Água (g)
	0	0,33	1000	0,0	330,0
	10	0,34	900	93,57	337,8
	30	0,33	700	280,71	323,6
	50	0,33	500	467,85	319,4

$\frac{a}{c+e}$  : relação  $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória}}$



**Tabela 7.3** Quantidade de materiais necessária para moldagem de argamassas com ACIGRAN e escória de alto-forno (EAF-G), traço 1: 3,0

TRAÇO	Teor (%)	Escória ACIGRAN			
		Areia = 1500 g			
		Relação $\frac{a}{c+e}$	Cimento (g)	Escória (g)	Água (g)
	0	0,53	650,0	0,0	344,5
	10	0,52	585,0	60,6	335,7
	30	0,51	455,0	181,8	324,8
1: 3,0	Teor (%)	Escória ALTO-FORNO			
		Areia = 1500 g			
		Relação $\frac{a}{c+e}$	Cimento (g)	Escória (g)	Água (g)
	0	0,53	650,0	0,0	344,5
	10	0,54	585,0	60,8	348,7
	30	0,53	455,0	182,46	350,6
	50	0,53	325,0	304,1	346,0

$\frac{a}{c+e}$  : relação  $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória}}$

**Tabela 7.4** Quantidade de materiais necessária para moldagem de argamassas com ACIGRAN e escória de alto-forno (EAF-G), traço 1: 4,5

TRAÇO	Teor (%)	Escória ACIGRAN			
		Areia = 1500 g			
		Relação $\frac{a}{c+e}$	Cimento (g)	Escória (g)	Água (g)
	0	0,80	520,0	0,0	416,0
	10	0,77	468,0	48,5	397,7
	30	0,77	364,0	148,5	392,3
1: 4,5	Teor (%)	Escória ALTO-FORNO			
		Areia = 1500 g			
		Relação $\frac{a}{c+e}$	Cimento (g)	Escória (g)	Água (g)
	0	0,80	520,0	0,0	416,0
	10	0,81	468,0	48,7	418,5
	30	0,82	364,0	146,0	418,2
	50	0,81	260,0	243,3	407,7

$\frac{a}{c+e}$  : relação  $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória}}$

## **7.3.2 Equipamentos Utilizados**

### **7.3.2.1 Resistência à compressão**

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em uma prensa universal SHIMADZU, modelo Autograph UH2000 KNG, de capacidade DE 40 a 2000 kN. A velocidade de carregamento empregada foi de 30 KN/min (0,254 MPa/s), ficando dentro dos limites estabelecidos pela norma NBR 7215 (1996).

### **7.3.2.2 Perda ao fogo**

A determinação da perda de massa e perda ao fogo foi realizada em um forno mufla, marca SANCHIS, de temperatura máxima 1150° C e taxa máxima de aquecimento: 300° C/h. O pH foi medido com auxílio de pHmetro, marca Quimis, modelo Q400.

### **7.3.2.3 Análise microestrutural**

A análise microestrutural das pastas foi feita com microscópio eletrônico de varredura (MEV) – elétrons secundários, marca PHILIPS, modelo XL20<sup>2</sup>, com um espectômetro por dispersão em energia (EDS)<sup>3</sup>, marca PHILIPS, acoplado

## **7.3.3 Apresentação dos Resultados**

As tabelas 7.5 a 7.7 e figuras 7.2 a 7.4 apresentam os resultados obtidos neste ensaio.

---

<sup>2</sup> Localizado no LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física da Escola de Engenharia - UFRGS

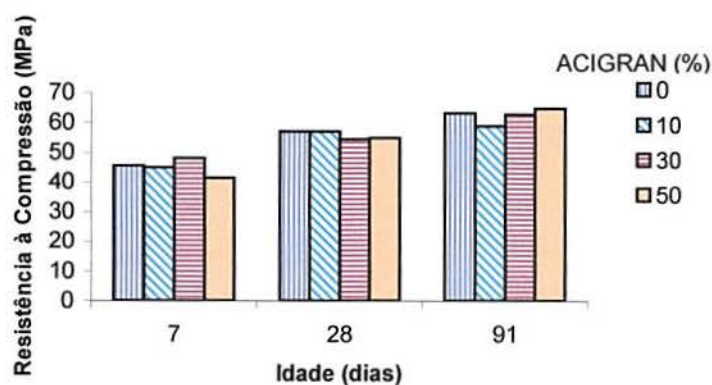
<sup>3</sup> EDS- “Energy Dispersive Spectrometre”



**Tabela 7.5** Resultados de resistência à compressão de argamassas com ACIGRAN de traço 1: 1,5 aos 7 ( $fc_7$ ), 28 ( $fc_{28}$ ) e 91 ( $fc_{91}$ ) dias

Teor (%)	$\frac{a}{c+e}$	$fc_7$ (MPa)	$fc_7$ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	$fc_{28}$ (MPa)	$fc_{28}$ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	$fc_{91}$ médio (MPa)	$fc_{91}$ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0	0,33	42,6	45,6	2,9	50,1	57,2	5,0	62,7	63,2	5,0
		44,5			61,0			66,2		
		47,8			60,6			60,6		
		43,5			57,1			63,4		
		49,5						53,0		
10	0,32	47,4	44,8	3,1	59,3	57,1	2,6	64,7	58,7	5,4
		40,4			59,5			52,7		
		46,1			53,4			53,5		
		41,4			57,4			60,1		
		46,5			55,7			62,7		
30	0,31	44,4	48,2	3,3	54,5	54,4	4,2	58,1	62,6	6,4
					49,0			66,0		
		49,4			60,2			62,7		
					56,0			71,3		
		50,7			52,3			55,0		
50	0,31	41,2	41,6	1,8	56,7	54,9	1,9	68,8	64,8	5,6
		39,3			53,5			60,9		
		42,0			53,1					
		41,3			56,3			62,4		
		44,4								

$\frac{a}{c+e}$  : relação  $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória}}$

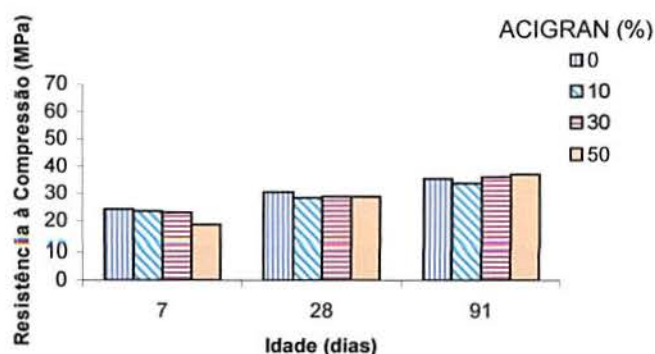


**Figura 7.2** Resistência à compressão axial, ao longo do tempo, das argamassas de traço 1: 1,5

**Tabela 7.6** Resultados de resistência à compressão de argamassas com ACIGRAN de traço 1: 3,0 aos 7 (fc<sub>7</sub>), 28 (fc<sub>28</sub>) e 91 (fc<sub>91</sub>) dias

Teor (%)	$\frac{a}{c+e}$	fc <sub>7</sub> (MPa)	fc <sub>7</sub> médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	fc <sub>28</sub> (MPa)	fc <sub>28</sub> médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	fc <sub>91</sub> médio (MPa)	fc <sub>91</sub> médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0	0,53	22,6	24,3	1,9	32,0	30,5	2,1	33,1	35,7	2,4
		25,9			27,2			33,9		
		25,5			30,3			35,9		
		25,8			31,3			39,5		
		21,2			29,0			37,2		
		24,8			33,2			34,6		
10	0,52	24,7	23,6	1,5	29,9	28,4	2,8	35,7	34,0	3,0
		24,6			31,3			29,8		
		24,9			29,2			38,2		
		22,1			29,7			34,9		
		21,8			26,1			34,4		
					24,0			31,3		
30	0,51	21,9	22,9	1,8	30,4	28,9	1,2	36,4	36,3	3,7
		23,8			28,8			37,4		
		20,1			29,0			35,4		
		24,9						35,9		
		22,1			27,6			28,3		
		24,6								
50	0,51	21,0	18,5	2,7	29,5	28,9	2,6	39,0	37,1	3,4
		20,2			24,4			41,0		
		20,2			31,3			37,2		
		15,1			29,6			31,1		
		19,6			29,6			38,2		
		15,0						35,9		

$\frac{a}{c+e}$  : relação  $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória}}$



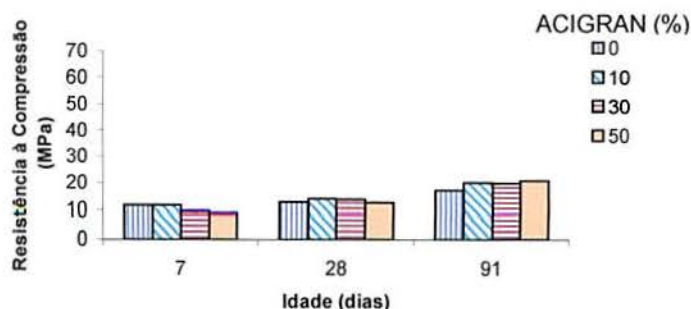
**Figura 7.3** Resistência à compressão axial , ao longo do tempo, das argamassas argamassas de traço 1: 3,0



**Tabela 7.7** Resultados de resistência à compressão de argamassas com ACIGRAN de traço 1: 4,5 aos 7 ( $fc_7$ ), 28 ( $fc_{28}$ ) e 91 ( $fc_{91}$ ) dias

Teor (%)	$\frac{a}{c+e}$	$fc_7$ (MPa)	$fc_7$ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	$fc_{28}$ (MPa)	$fc_{28}$ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	$fc_{91}$ médio (MPa)	$fc_{91}$ médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0	0,80	11,7	11,7	0,34	12,6	12,7	2,3	17,3	17,3	1,7
		11,6			16,6			18,1		
		12,1			9,9			17,3		
		11,1			12,5			18,1		
		11,7			13,6			18,8		
		11,8			11,1			14,0		
10	0,77	11,7	11,6	0,87	14,7	14,1	2,4	21,7	20,2	1,8
		12,5			13,1			22,7		
		12,4			14,6			20,4		
		11,7			9,7			18,8		
		10,4			16,3			19,9		
		10,7			16,0			17,6		
30	0,77	9,9	9,5	0,67	15,0	13,9	2,2	19,6	19,8	2,0
		9,3			14,9			21,1		
		9,9			14,0			20,1		
		10,3			14,4			16,0		
		8,4			9,6			21,4		
		9,3			15,5			20,6		
50	0,75	10,5	9,0	1,36	9,8	12,6	2,6	20,9	20,8	1,3
		7,2			10,1			21,1		
		10,2			15,4			18,3		
		7,6			14,8			21,4		
		9,2			14,7			21,9		
		9,1			11,0			21,1		

$\frac{a}{c+e}$ : relação  $\frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{escória}}$



**Figura 7.4** Resistência à compressão axial, ao longo do tempo, das argamassas de traço 1: 4,5

As tabelas 7.8 a 7.10 e figuras 7.5 a 7.7 apresentam os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão em argamassas com escória de alto-forno (EAF-G).

**Tabela 7.8** Resultados de resistência à compressão de argamassas traço 1: 1,5 com escória de alto-forno (EAF-G)

Teor (%)	$\frac{a}{c+e}$	fc <sub>7</sub> (MPa)	fc <sub>7</sub> médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	fc <sub>28</sub> (MPa)	fc <sub>28</sub> médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
10	0,34	46,6	43,5	3,5	53,3	45,3	5,6
		46,4			48,1		
		44,1			39,4		
		38,2			44,8		
		42,1			40,8		
30	0,33	50,0	46,2	3,0	48,6	47,5	3,4
		47,0			48,7		
		41,6			43,9		
		46,0			48,7		
		46,3					
50	0,33	35,4	39,7	3,8	44,9	47,0	5,3
		36,8			48,4		
		39,6			53,8		
		44,7			39,5		
		43,6			48,5		
		37,8					

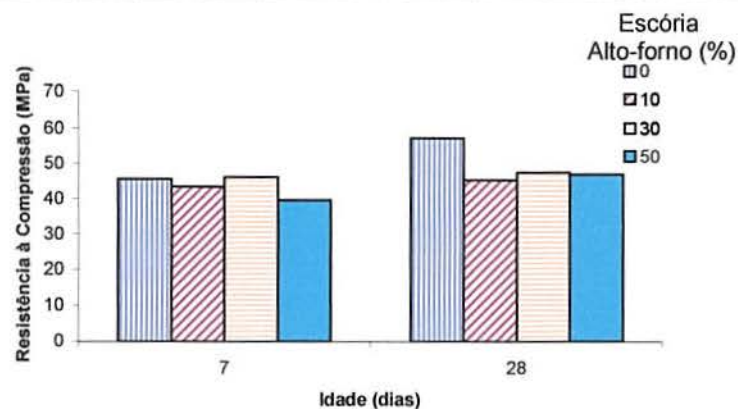
**Tabela 7.9** Resultados de resistência à compressão de argamassas de traço 1: 3,0 com escória de alto-forno (EAF-G)

Teor (%)	$\frac{a}{c+e}$	Fc <sub>7</sub> (MPa)	Fc <sub>7</sub> médio (Mpa)	Desvio Padrão	Fc <sub>28</sub> (MPa)	Fc <sub>28</sub> médio (MPa)	Desvio Padrão
10	0,54	22,3	21,5	2,4	27,7	26,3	2,0
		19,3			23,9		
		18,8			25,4		
		24,3			27,7		
		23,0			23,3		
30	0,55	18,8	18,3	2,9	29,6	27,3	1,4
		15,6			28,3		
		15,7			26,4		
					29,2		
		22,7			27,1		
50	0,54	15,2	17,7	2,2	25,7	25,5	1,4
		20,0			28,5		
		16,5			26,0		
					23,2		
		19,1			24,4		
					25,5		

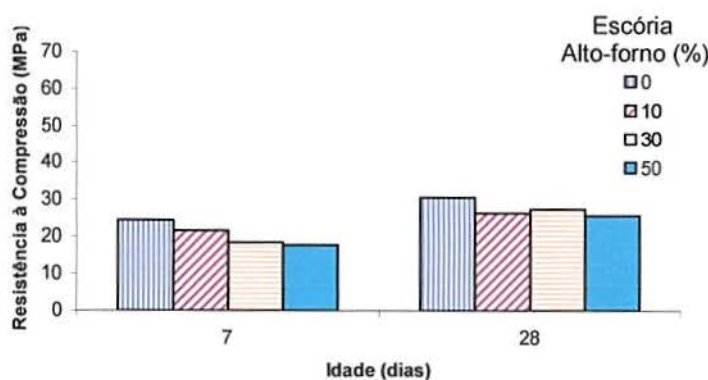


**Tabela 7.10** Resultados de resistência à compressão de argamassas de traço 1: 4,5 com escória de alto-forno (EAF-G).

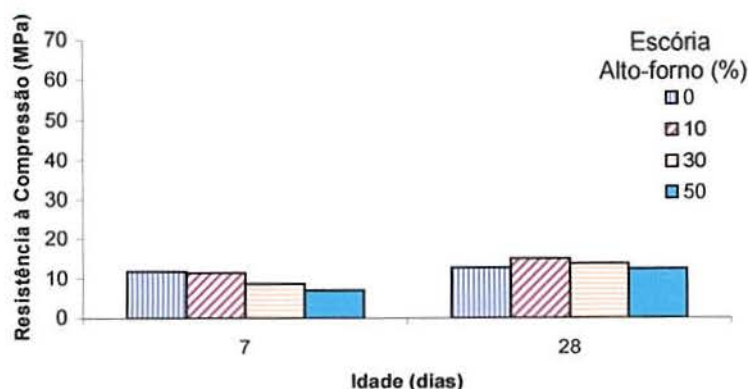
Teor (%)	A/ (c+e)	Fc <sub>7</sub> (MPa)	Fc <sub>7</sub> médio (MPa)	Desvio Padrão	Fc <sub>28</sub> (MPa)	Fc <sub>28</sub> médio (MPa)	Desvio Padrão
10	0,81	11,9	11,4	0,5	16,2	15,0	1,24
		10,6			12,9		
		11,1			15,8		
		11,8			15,2		
		11,4			14,3		
					15,8		
30	0,82	8,0	8,6	0,7	14,5	13,7	1,73
		7,4			12,6		
		9,3			12,7		
		9,4			11,4		
		8,5			15,7		
		8,8			15,4		
50	0,81	7,7	6,9	0,8	13,6	12,3	0,98
		6,7			11,5		
		6,2			12,7		
		6,9			12,6		
					11,2		



**Figura 7.5** Resistência à compressão, ao longo do tempo, de argamassas de traço 1: 1,5 com escórias de alto-forno (EAF-G).



**Figura 7.6** Resistência à compressão, ao longo do tempo, de argamassas de traço 1: 3,0 com escórias de alto-forno (EAF-G).



**Figura 7.7** Resistência à compressão, ao longo do tempo, de argamassas de traço 1: 4,5 com escórias de alto-forno (EAF-G).

### 7.3.4 Análise e Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos tiveram tratamento estatístico, através de Análise de Variância (ANOVA), que tem por objetivo verificar se os valores das variáveis de resposta, medidos em diferentes níveis, diferem entre si, com um nível de significância de 95 % (RIBEIRO, 2000). A análise foi realizada com o auxílio do programa "Statistica".

A variável em questão será considerada estatisticamente significativa, quando o  $F_{\text{calculado}}$  ("F<sub>calc</sub>") (baseado na distribuição de Fischer) for maior que o  $F_{\text{tabelado}}$  "F<sub>0,05</sub>".

A tabela 7.11 sintetiza os resultados obtidos na análise estatística quanto à resistência à compressão das argamassas com ACIGRAN, mostrando os fatores que apresentam diferenças significativas, ao nível de significância de 95 %.

**Tabela 7.11** Análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, traço e teor na resistência à compressão de argamassas com ACIGRAN

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Idade	2	2630,70	328,660	3,03	S
Traço	2	24169,31	3019,541	3,03	S
Teor	3	8,37	1,046	2,64	NS
Idade x Traço	4	102,95	12,862	2,41	S
Idade x Teor	6	41,28	5,157	2,14	S
Traço x Teor	6	9,84	1,229	2,14	NS
Idade x Traço x Teor	12	9,40	1,174	1,79	NS
ERRO	158	8,004			

**GDL:** Grau de Liberdade

**MQ:** Média Quadrática

**F<sub>calc</sub>:** Valor calculado de F

**F<sub>0,05</sub>:** Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

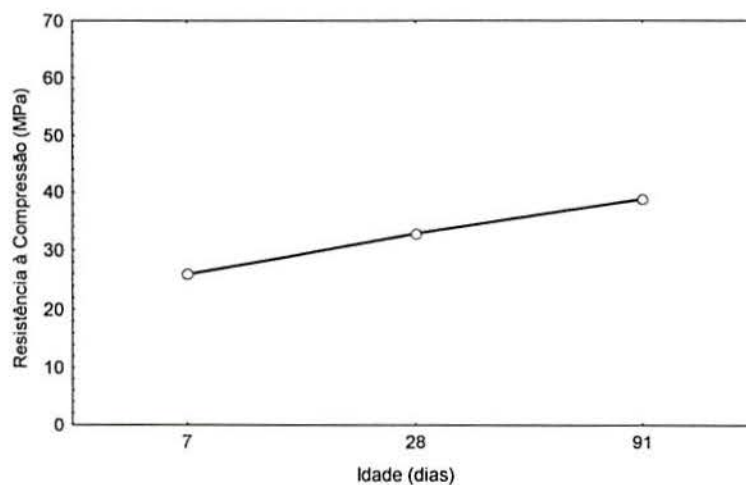
**S:** Significativo

**NS:** Não Significativo

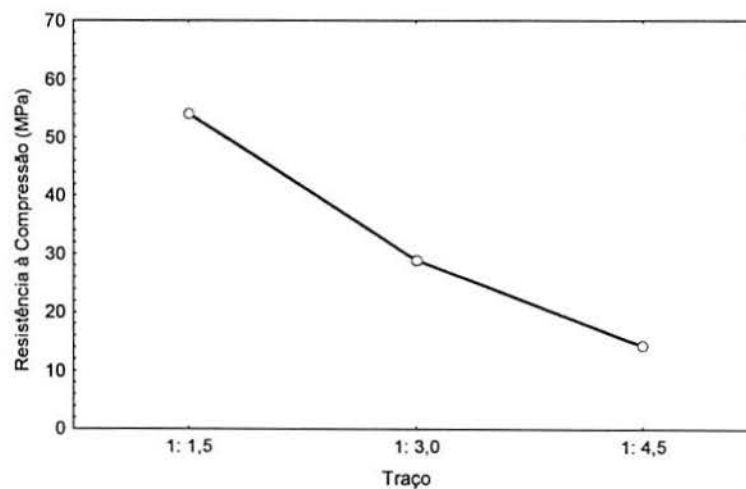
**\*Significância:** F<sub>calc</sub> > F<sub>0,05</sub> : S  
F<sub>calc</sub> < F<sub>0,05</sub> : NS



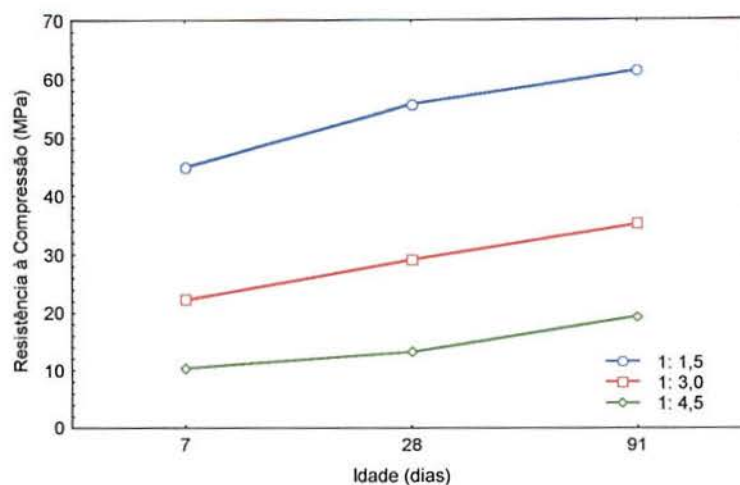
Com base nos resultados obtidos na ANOVA, pode-se verificar que tanto a idade como o traço apresentam influência significativa nos resultados de resistência à compressão, assim como existe uma interação entre estas duas variáveis. Estes comportamentos podem ser vistos nas figuras 7.8 a 7.10, onde observa-se o desempenho esperado que é o de acréscimo da resistência com a idade e o decréscimo da mesma com a redução do consumo de cimento.



**Figura 7.8** Efeito da idade na resistência à compressão das argamassas

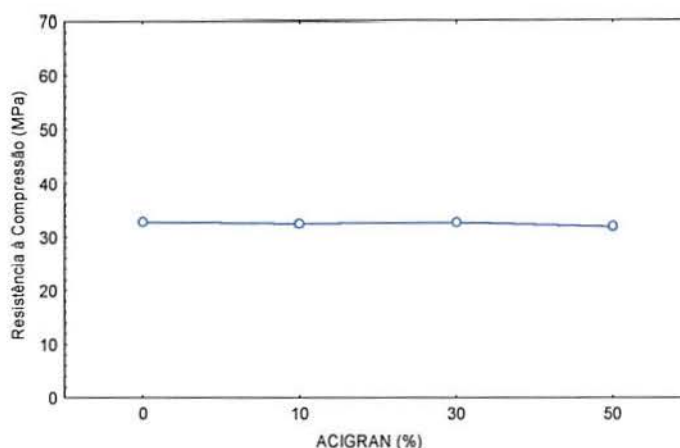


**Figura 7.9** Efeito do traço na resistência à compressão das argamassa



**Figura 7.10** Efeito da interação entre traço e idade na resistência à compressão das argamassas

O mesmo não ocorreu em relação ao teor de substituição. Independente do teor adotado os níveis de resistência são os mesmos. Apesar de neste trabalho apenas serem apresentados os gráficos cujas variáveis são estatisticamente significativas, a figura 7.11 é mostrada para evidenciar a potencialidade do uso da ACIGRAN. Este comportamento se repete ao analisar o efeito da interação do traço com o teor de substituição.



**Figura 7.11** Influência do teor de substituição na resistência à compressão das argamassas

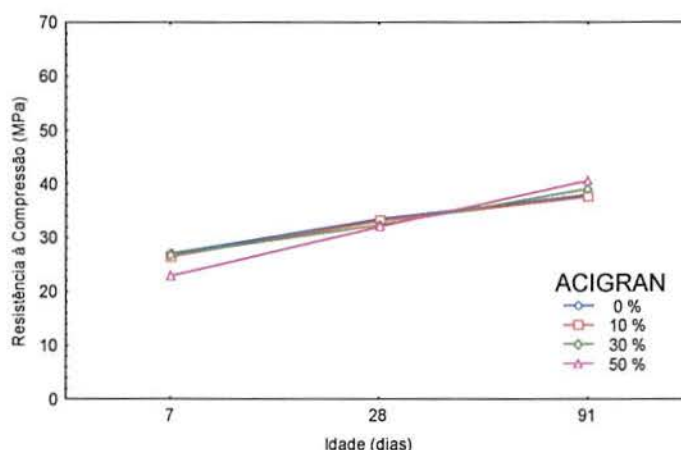
Calculando-se o índice de hidraulicidade, apresentado na tabela 6.10 (capítulo 6), conforme NBR 5735/1991, obtém-se o valor de 1,865. A referida norma estabelece que cimentos com escórias de alto-forno devam possuir este índice superior a 1, verificando-se, assim, que a ACIGRAN apresenta propriedades hidráulicas. Desta forma, com base na composição química e no grau de vitrificação, justifica-se os mesmos níveis de resistência das argamassas com e sem escórias, devido à reatividade da ACIGRAN, possivelmente associado a um efeito físico, o qual pode ser proporcionado pelo efeito microfíler, de preenchimento de vazios e de refinamento da estrutura de poros devido à escória atuar



como pontos de nucleação para os produtos de hidratação. Segundo DAL MOLIN (1995), este efeito basea-se no princípio que o material vai distribuir-se nos vazios existentes entre os grãos de clínquer, favorecendo o início das reações de hidratação de um maior número de partículas simultaneamente, de tal forma que o espaço disponível para o crescimento dos produtos de hidratação fica restrito, gerando um grande número de cristais pequenos, ao invés de poucos de grande dimensão.

O efeito fíler é evidenciado em argamassas com altos teores a baixas idades, onde apesar de inferiores ao de referência, apresentam bons níveis de resistência.

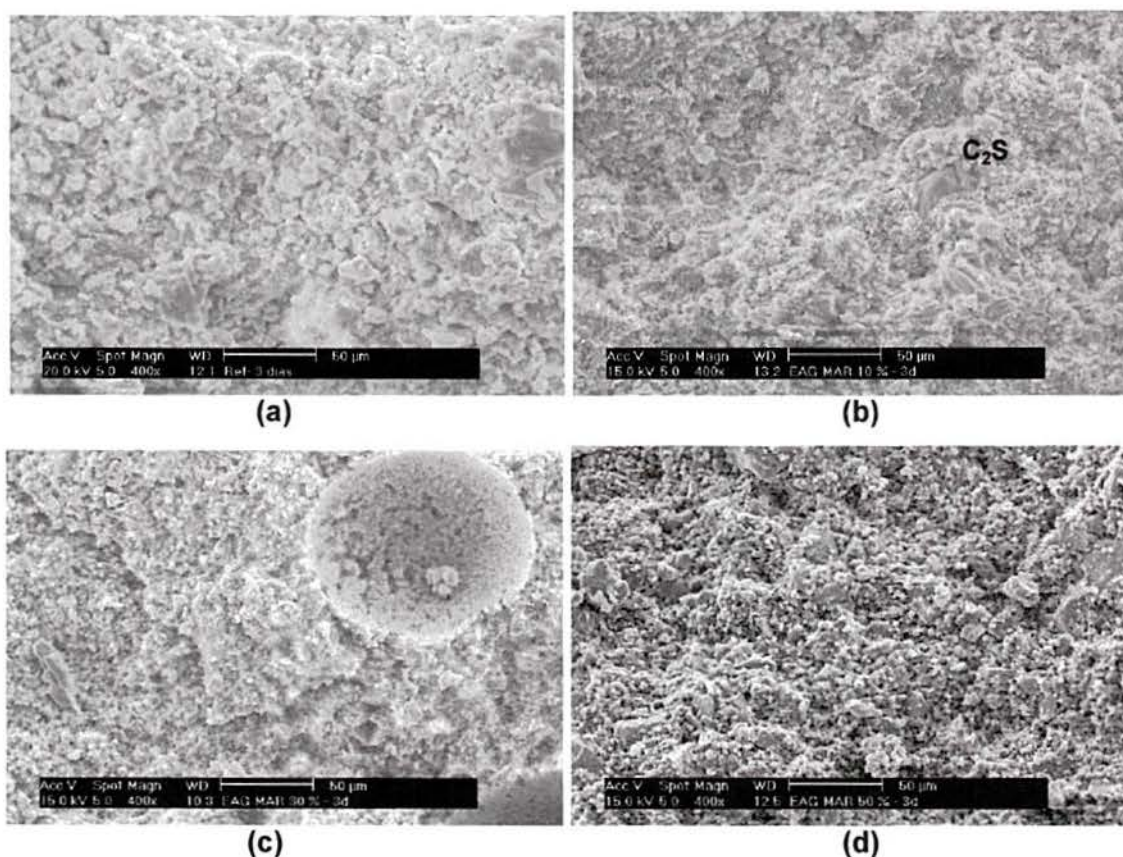
Observa-se que existe uma influência estatisticamente significativa da interação entre o teor de substituição e a idade na resistência à compressão, como pode ser visto na figura 7.12. Nota-se que a substituição de 50 % apresenta menores resultados de resistência à compressão aos 7 dias. Entretanto, aos 91 dias, supera o desempenho das argamassas com outros teores de ACIGRAN, evidenciando o efeito da reação química da escória (ACIGRAN) ao longo do tempo.



**Figura 7.12** Efeito da interação da idade e do teor de substituição na resistência à compressão das argamassas

Conforme análise, não foi observado interação entre as três variáveis teor, traço e idade.

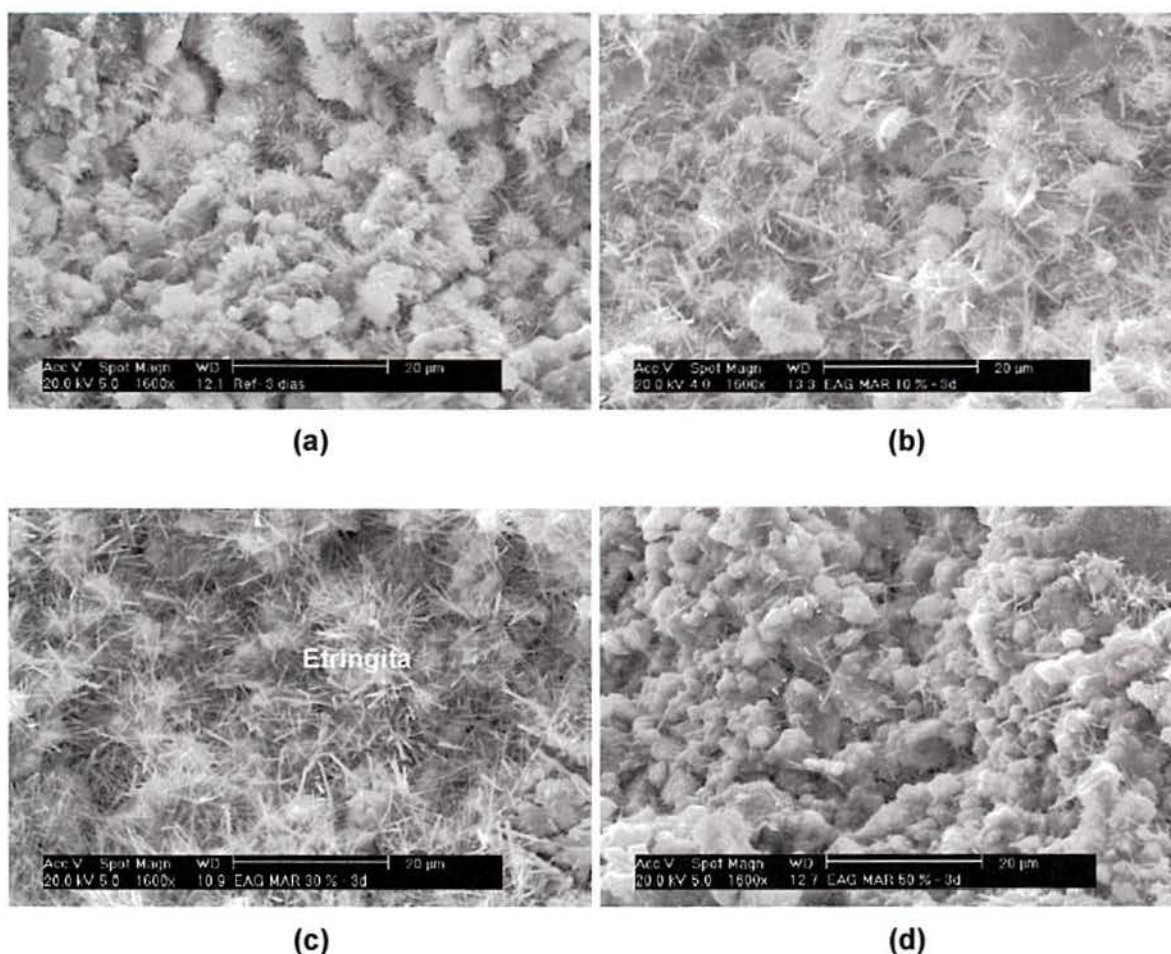
Com vistas a observar a microestrutura e morfologia dos compostos anidros e hidratados foram moldadas pastas com substituição de 0, 10, 30 e 50 %, com relação água/aglomerante igual a 0,53, as quais foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) – elétrons secundários. As figuras 7.13 a 7.15 ilustram a formação dos cristais ao longo do tempo.



**Figura 7.13** Micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários ; Ampliação 400 x. Pasta com 3 dias de idade **(a)** Referência **(b)** 10 % de ACIGRAN **(c)** 30 % de ACIGRAN **(d)** 50 % de ACIGRAN

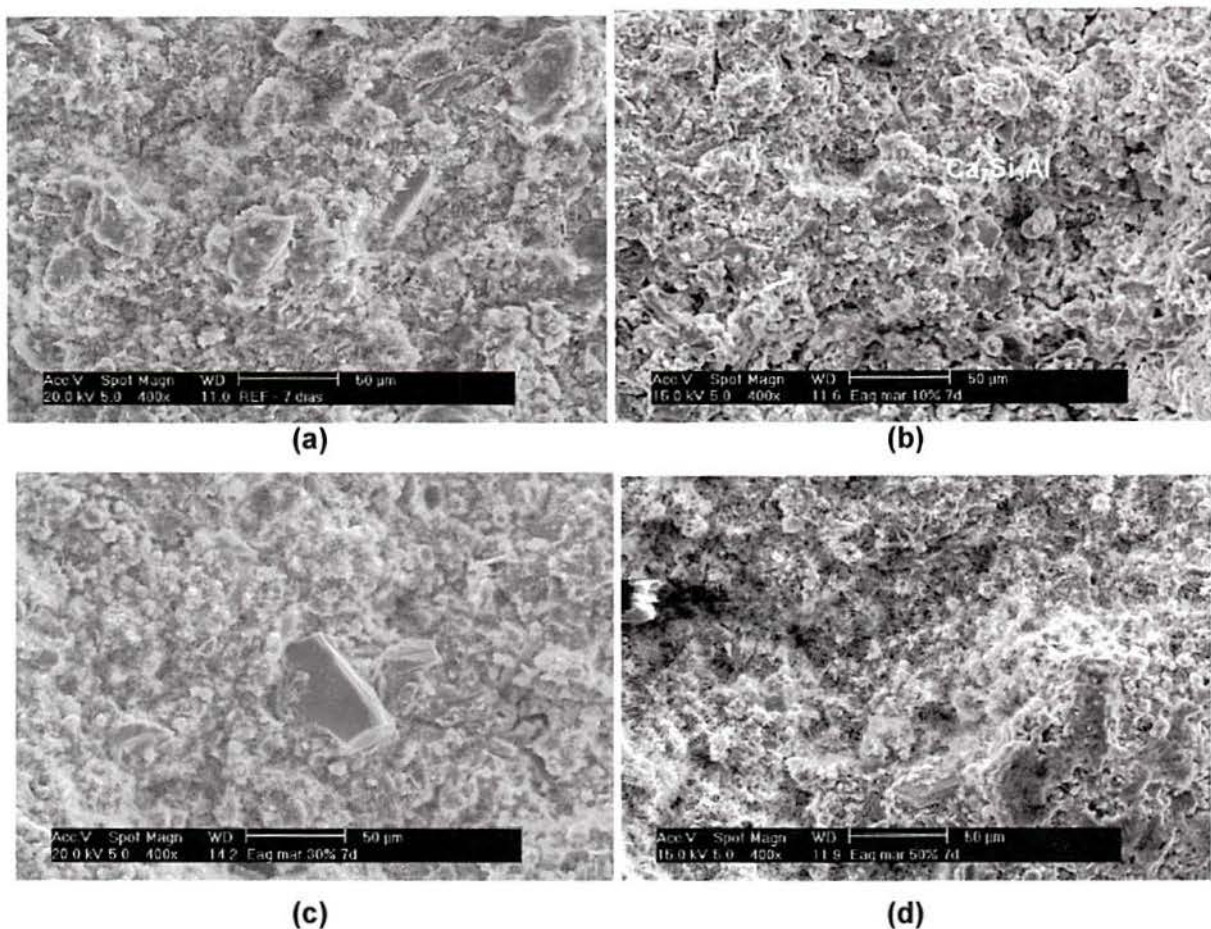
Observa-se que as pastas com 50% de ACIGRAN, apesar de, a baixas idades apresentarem resistências ligeiramente inferiores as da referência, possuem estrutura aparentemente mais densa (figura 7.13 e figura 7.14), possivelmente associada a um melhor arranjo granulométrico.





**Figura 7.14** Micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários ; Ampliação 1600 x. Pasta com 3 dias de idade (a) Referência (b) 10 % de ACIGRAN (c) 30 % de ACIGRAN (d) 50 % de ACIGRAN

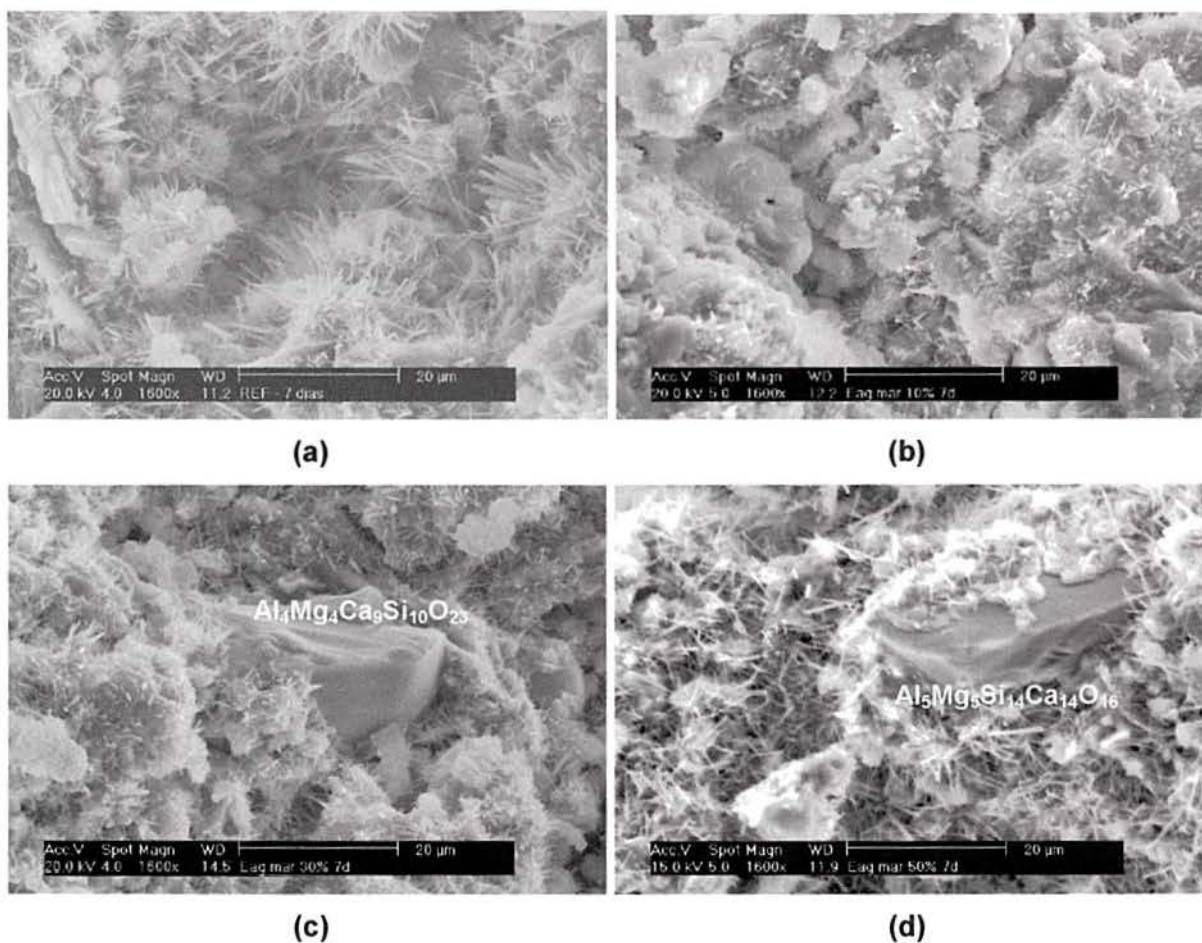
A partir dos 7 dias já é possível identificar cristais de maior volume, principalmente nas pastas de referência, os quais podem vir prejudicar o desempenho mecânico. Verifica-se também (figura 7.15), na pasta de referência, um grande número de cristais aciculares (etringita).



**Figura 7.15** Micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários ; Ampliação 400 x. Pasta com 7 dias de idade **(a)** Referência **(b)** 10 % de ACIGRAN **(c)** 30 % de ACIGRAN **(d)** 50 % de ACIGRAN

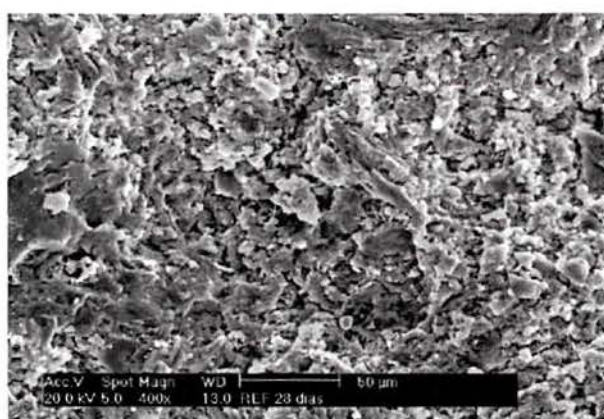
A figura 7.16 (c) e (d) mostra, em detalhe, alguns destes cristais de maior dimensão existentes nas pastas com 30 % e 50% de ACIGRAN, respectivamente.



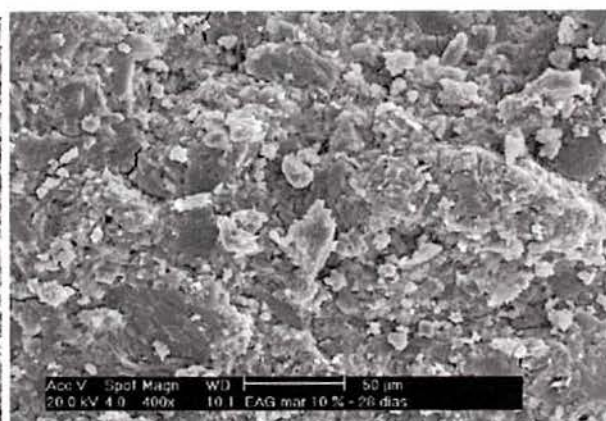


**Figura 7.16** Micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários ; Ampliação 1600 x. Pasta com 7 dias de idade (a) Referência (b) 10 % de ACIGRAN (c) 30 % de ACIGRAN (d) 50 % de ACIGRAN

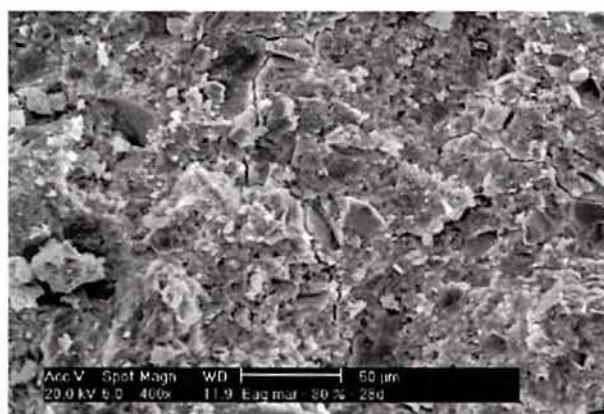
Na figura 7.17 e em mais detalhe na figura 7.18, confirma-se o já observado aos 3 dias, que as pastas com 50 % de ACIGRAN são mais densas que as demais



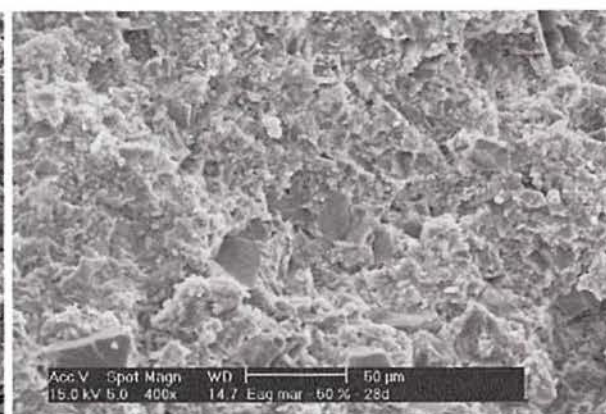
(a)



(b)



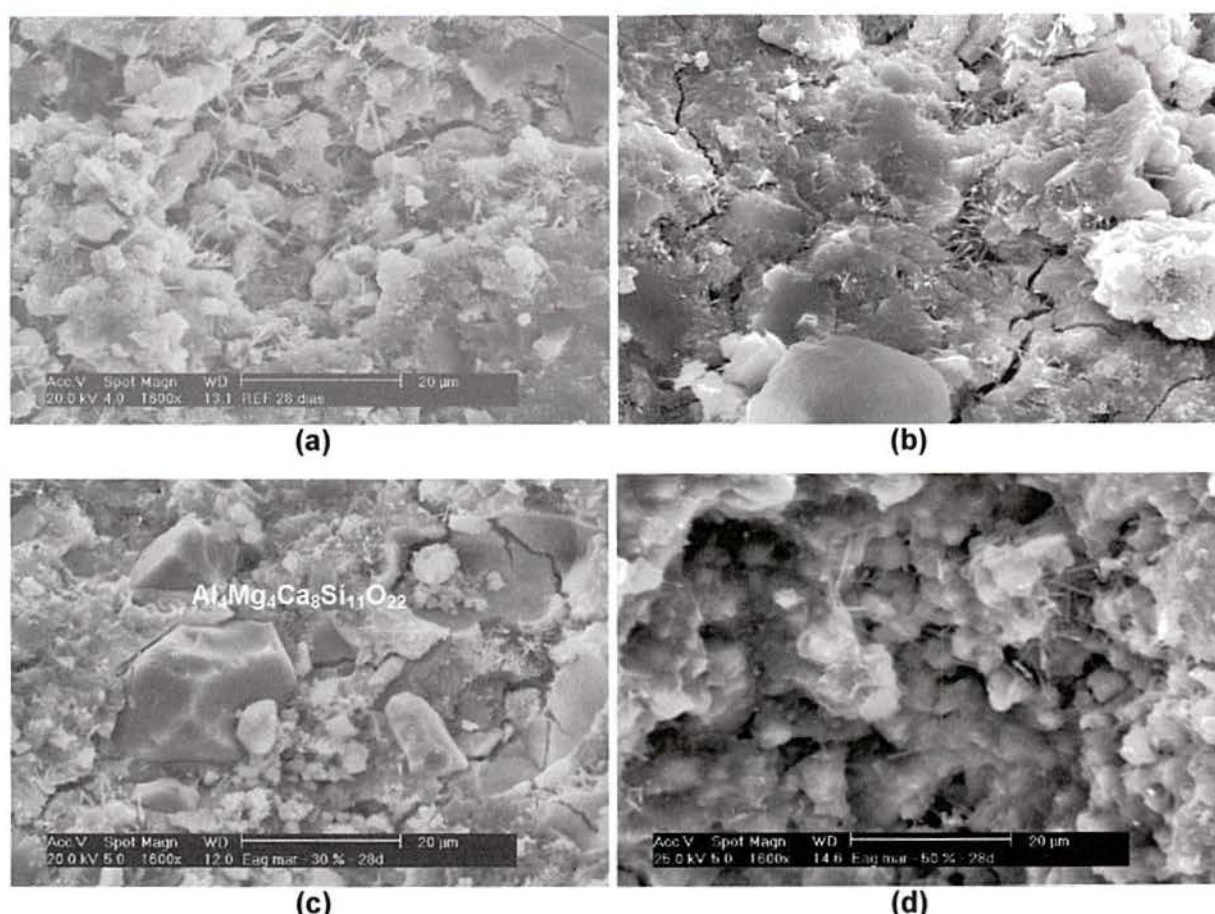
(c)



(d)

**Figura 7.17** Micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários ; Ampliação 1600 x. Pasta com 28 dias de idade **(a)** Referência **(b)** 10 % de ACIGRAN **(c)** 30 % de ACIGRAN **(d)** 50 % de ACIGRAN





**Figura 7.18** Micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários ; Ampliação 1600 x. Pasta com 91 dias de idade (a) Referência (b) 10 % de ACIGRAN (c) 30 % de ACIGRAN (d) 50 % de ACIGRAN

Para comprovar a hipótese que os níveis de resistência a mais baixas idades (7 dias) é decorrente do efeito pozolânico da ACIGRAN, somado ao fato que na substituição de cimento por ACIGRAN está-se efetuando a substituição de um material com maior teor de CaO (cimento= 62,24 %) por um com menor (ACIGRAN= 39,42 %), foi avaliado o teor de hidróxido de cálcio através de titulometria<sup>4</sup> em pastas com os mesmos teores das argamassas ensaiadas. Analisou-se também o pH de cada mistura.

Adotou-se trabalhar com pastas e não com argamassas com bases nos resultados obtidos por SEIDLER (1999), onde não foi verificado diferença significativa entre os resultados obtidos.

As pastas foram confeccionadas com relação a/c igual a 0,53, referente à relação empregada no traço intermediário (1: 3,0).

A moldagem da mesma foi manual em virtude da quantidade de material. Após a mistura, as pastas eram colocadas em potes, vibradas durante 20 segundos com auxílio de

<sup>4</sup> Ensaio realizado no Instituto de Química - UFRGS

uma bomba de aquário, fechadas hermeticamente e colocadas em câmara úmida. Após 24 horas, as mesmas eram desmoldadas e retornavam para câmara até as distintas datas nas quais seriam removidas para preparação e posterior análise de hidróxido de cálcio.

Para preparação da amostra foram descartadas as extremidades e toda a amostra restante foi misturada para minimizar algum defeito na moldagem.

A porcentagem de hidróxido de cálcio, bem como o pH, estão apresentados nas tabelas 7.12 e 7.13, respectivamente. Cada valor representa a média de duas leituras.

**Tabela 7.12** Hidróxido de cálcio ao longo do tempo em pastas com distintos teores de ACIGRAN

	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	91 dias
Referência	2,57	2,58	2,81	2,19	2,19
	2,46	2,58		2,38	4,08
10% ACIGRAN	2,25	2,35	3,13	2,46	2,74
	2,57	2,31		3,16	2,49
30% ACIGRAN	2,16	2,18	1,73	2,22	2,31
	1,82	2,18		2,44	1,92
50% ACIGRAN	1,81	1,91	2,33	1,60	1,88
	1,87	1,86		2,22	1,31

**Tabela 7.13** Valor do pH em função da idade

	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	91 dias
Referência	13,54	13,54	13,58	13,47	13,47
	13,52			13,50	13,74
10% ACIGRAN	13,48	13,50	13,52	13,52	13,57
	13,57	13,49		13,63	13,59
30% ACIGRAN	13,46	13,47	13,57	13,48	13,49
	13,39			13,52	13,41
50% ACIGRAN	13,39	13,41	13,5	13,33	13,4
	13,40	13,40		13,48	13,25

Os resultados da análise estatística referente à influência do teor de substituição e da idade no teor de hidróxido de cálcio e no pH estão indicados na tabela 7.14 e 7.15, respectivamente.

**Tabela 7.14** Análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de ACIGRAN no consumo de hidróxido de cálcio

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Idade	2	0,005373	0,2284	3,06	NS
Teor	3	4,1972	178,3696	2,67	S
Idade x Teor	6	0,003149	0,1338	2,16	NS
ERRO	182	0.02353			

Gdl: Grau de Liberdade

MQ: Média Quadrática

F<sub>calc</sub>: Valor calculado de F

F<sub>0,05</sub>: Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

S: Significativo

NS: Não Significativo

\*Significância: F<sub>calc</sub> > F<sub>0,05</sub> : S  
F<sub>calc</sub> < F<sub>0,05</sub> : NS



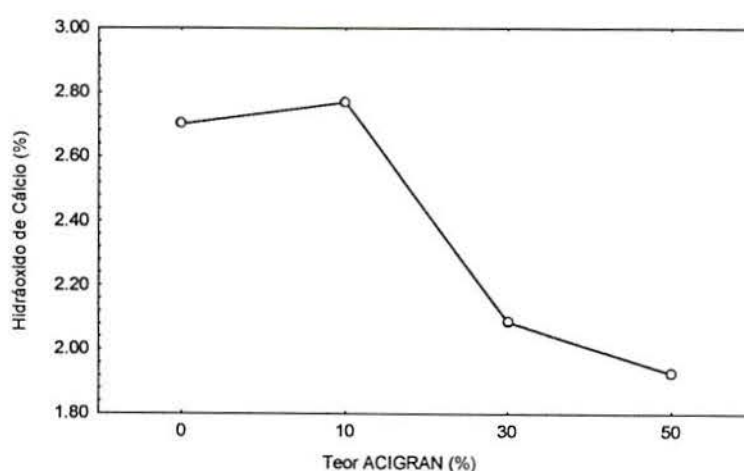
**Tabela 7.15** Análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de ACIGRAN no pH

FATOR	GDL	MQ	F <sub>calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Idade	4	3,15571	0,920015	2,87	NS
Teor	3	3,210687	0,890911	3,10	NS
Idade x Teor	12	3,637826	1,009435	2,28	NS
ERRO	20	3,603825			

**Gdl:** Grau de Liberdade**MQ:** Média Quadrática**F<sub>calc</sub>:** Valor calculado de F**F<sub>0,05</sub>:** Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %**S:** Significativo**NS:** Não Significativo**\*Significância:** F<sub>calc</sub> > F<sub>0,05</sub> : SF<sub>calc</sub> < F<sub>0,05</sub> : NS

A única variável que mostrou ter influência significativa no consumo de hidróxido foi o teor de substituição. Observa-se na figura 7.19 que quanto maior o teor de ACIGRAN, menor o teor de hidróxido de cálcio. Este comportamento está associado, provavelmente, a soma de dois fatores. A escória possui um menor teor de cálcio que o clínquer. Ao substituir-se cimento por ACIGRAN, a quantidade de óxido de cálcio final será menor, conseqüentemente a sua produção de hidróxido de cálcio também. Somado a isto a ACIGRAN, por possuir características pozolânicas, consome  $\text{Ca(OH)}_2$ , reduzindo ainda mais a quantidade final de hidróxido de cálcio.

A idade não mostrou influenciar significativamente, pois provavelmente o hidróxido de cálcio gerado, decorrente da hidratação do cimento e da ACIGRAN é compensado pelo consumo do hidróxido pela ACIGRAN.

**Figura 7.19** Influência do teor de substituição da escória na quantidade de hidróxido de cálcio

Não houve influência significativa do teor de substituição, idade e interação entre estas duas variáveis no pH das pastas, apesar de observar que o pH da pasta de referência, para todas as idades, é levemente superior ao das pastas com ACIGRAN.

Este comportamento verificado vai ao encontro dos resultados obtidos por SEIDLER (1999) que, estudando pastas e argamassas com até 30 % de adição de sílica ativa, cinza

volante e cinza de casca de arroz, não observou diferenças estatisticamente significativas entre os valores de pH da pastas com e sem adição, concluindo que o uso de adições minerais não reduz o pH a ponto de provocar despassivação das armaduras.

Com o objetivo de determinar o grau de hidratação da escória determinou-se o teor de água não evaporável e sólidos não hidratados. Para determinação destas duas características foram adotados os mesmos procedimentos empregados por JOHN (1995).

A água não evaporável é estimada pela perda de massa por aquecimento em forno com atmosfera de nitrogênio, até a temperatura de 580° C, de amostras previamente secas em estufa ventilada a 105° C.

O teor de sólidos combinados baseia-se no princípio que a escória não é dissolvida em valores de pH de aproximadamente 11,6, logo considera-se que todos os compostos hidratados são dissolvidos e que o resíduo insolúvel é constituído apenas de escória.

A determinação do teor de sólidos é feita pela diferença de massa do resíduo insolúvel submetido à secagem por uma hora a 105° C e perda ao fogo a 1000° C.

Para estas duas determinações foram moldadas pastas com 0, 10, 30 e 50 % de substituição de cimento por ACIGRAN e relação água/aglomerante 0,53. As pastas foram moldadas, vibradas com auxílio de bomba de aquário e colocadas em potes hermeticamente fechados. Após 24 horas, os mesmos foram desmoldados, guardados em potes também fechados e armazenados em câmara úmida com umidade superior a 95% e temperatura  $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$ , até completarem 28 dias de idade. Ao atingirem esta idade, as amostras foram retiradas do ambiente de cura, sendo removidas as extremidades e a parte central da amostra foi moída e encaminhada para realização dos respectivos ensaios.

Analizou-se apenas uma idade em virtude de não se ter material disponível para realização de outras idades.

A tabela 7.16 apresenta os resultados obtidos da porcentagem de água não evaporável e de sólidos hidratados, em função do teor de substituição<sup>5</sup>

**Tabela 7.16** Valores de água não evaporável e sólidos hidratados em função do teor de substituição

ACIGRAN (%)	Água não evaporável (%)	Sólidos hidratados (%)
0	22,3	16,007
10	22,1	16,763
30	22,3	14,892
50	19,7	13,423

<sup>5</sup> Ensaios realizados no LACER da Escola de Engenharia - UFRGS



Analisando estatisticamente (tabela 7.17 e 7.18) verifica-se que não há influência do teor de substituição tanto na quantidade de água não evaporável, quanto no teor de sólidos não hidratados, ou seja, não houve alteração nas reações de hidratação com o teor de ACIGRAN (%).

**Tabela 7.17** Análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de substituição de ACIGRAN na quantidade de água não evaporável

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Teor	3	3,2266	-	6,59	N.S.
ERRO	4				

**Gdl:** Grau de Liberdade

**MQ:** Média Quadrática

**F<sub>calc</sub>:** Valor calculado de F

**F<sub>0,05</sub>:** Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

**S:** Significativo

**NS:** Não Significativo

**\*Significância:** F<sub>calc</sub> > F<sub>0,05</sub> : S

F<sub>calc</sub> < F<sub>0,05</sub> : NS

**Tabela 7.18** Análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de substituição de ACIGRAN nos sólidos hidratados

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Teor	3	4,138910	-	-	N.S.
ERRO	4	0,0			

**Gdl:** Grau de Liberdade

**MQ:** Média Quadrática

**F<sub>calc</sub>:** Valor calculado de F

**F<sub>0,05</sub>:** Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

**S:** Significativo

**NS:** Não Significativo

**\*Significância:** F<sub>calc</sub> > F<sub>0,05</sub> : S

F<sub>calc</sub> < F<sub>0,05</sub> : NS

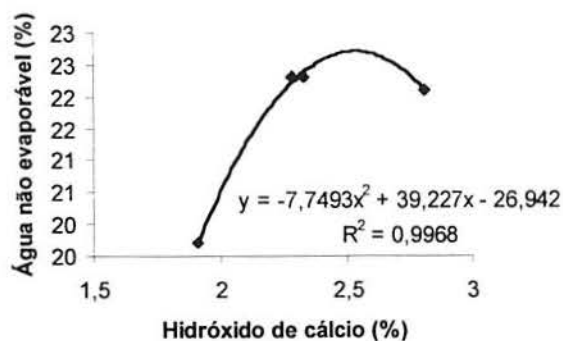
Entretanto observa-se que as argamassas de referência e com 10 e 30 % de substituição apresentaram praticamente os mesmos valores absolutos de água não evaporável aos 28 dias, superior ao da argamassa com 50 % de ACIGRAN.

Já para o teor de sólidos hidratados, observou-se uma queda para os teores de 30 e 50 %.

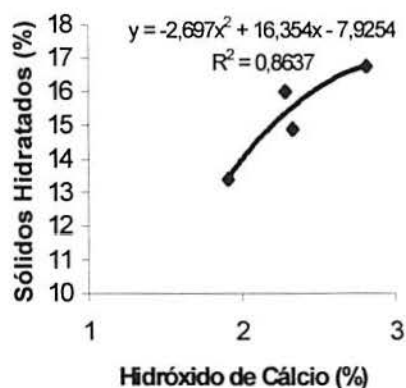
Apesar da diferença apresentada nos resultados de água não evaporável e sólidos hidratados não ser estatisticamente significativa, a redução para o teor de, principalmente 50%, deve-se provavelmente ao efeito pozolânico e a menor quantidade de clínquer, conseqüentemente, menor teor de CaO, como pode ser confirmado pela figura 7.19, onde verifica-se um menor teor de hidróxido de cálcio para esta substituição. Os valores obtidos estão de acordo com a análise de resistência à compressão, onde apesar de não se verificar influência significativa do teor de substituição, os valores obtidos são ligeiramente inferiores para 50 % de substituição, como pode ser visto nas tabelas 7.4 a 7.6.

A relação entre a água não evaporável e a presença do hidróxido de cálcio pode ser vista na figura 7.20. A figura 7.21 ilustra a relação entre os sólidos hidratados e o hidróxido

de cálcio. Como era esperado a água não evaporável e os sólidos hidratados, crescem com a quantidade de produtos hidratados, no caso, o hidróxido de cálcio.



**Figura 7.20** Porcentagem de água não evaporável em função do teor hidróxido de cálcio



**Figura 7.21** Porcentagem de sólidos hidratados em função do teor hidróxido de cálcio

Realizou-se, em termos de resistência à compressão, um estudo para verificar se as argamassas com escórias ACIGRAN e de alto-forno apresentavam igual desempenho em relação a esta propriedade.

Na tabela 7.19 é apresentado o resultado da análise estatística do estudo comparativo entre as duas escórias.



**Tabela 7.19** Análise de variância (ANOVA) dos resultados da resistência à compressão de argamassas com ACIGRAN e alto-forno

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Idade	1	1538,41	96,419	3,91	S
Traço	2	18709,88	1172,636	3,06	S
Teor	2	31,08	1,948	3,06	NS
Tipo de escória	1	198,24	12,424	3,91	S
Idade x Traço	2	39,52	2,477	3,06	NS
Idade x Teor	2	21,77	1,364	3,06	NS
Traço x Teor	4	52,03	3,261	2,44	S
Idade x Escória	1	64,99	4,073	3,91	S
Traço x Escória	2	140,47	8,810	3,06	S
Teor x Escória	2	18,00	1,128	3,06	NS
Idade x Traço x Teor	4	28,13	1,763	2,44	NS
Idade x Traço x Escória	2	53,67	3,364	3,06	S
Idade x Teor x Escória	2	11,73	0,735	3,06	NS
Traço x Teor x Escória	4	46,55	2,917	2,44	S
Idade x Traço x Teor x Escória	4	28,14	1,763	2,44	NS
Erro	151	15,95			

**Gdl:** Grau de Liberdade

**MQ:** Média Quadrática

**F<sub>calc</sub>:** Valor calculado de F

**F<sub>0,05</sub>:** Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

**S:** Significativo

**NS:** Não Significativo

**\*Significância:** F<sub>calc</sub> > F<sub>0,05</sub> : S

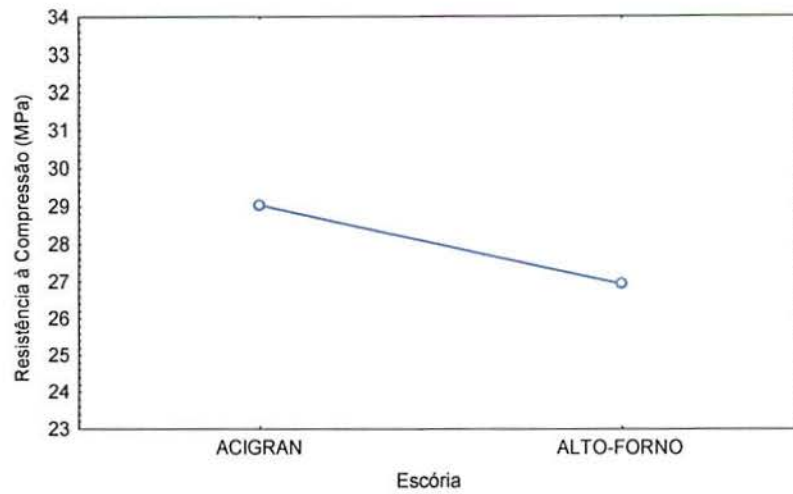
F<sub>calc</sub> < F<sub>0,05</sub> : NS

Existem diferenças significativas nos resultados de resistência à compressão das argamassas com escórias ACIGRAN e alto-forno (EAF-G), sendo que as primeiras apresentaram valores superiores ( figura 7.22), chegando a um acréscimo de 26 % aos 28 dias. Este efeito positivo, pode ser observado na figura 7.23, onde verifica-se que a velocidade de ganho de resistência para argamassas com ACIGRAN é maior do que com argamassas de alto-forno.

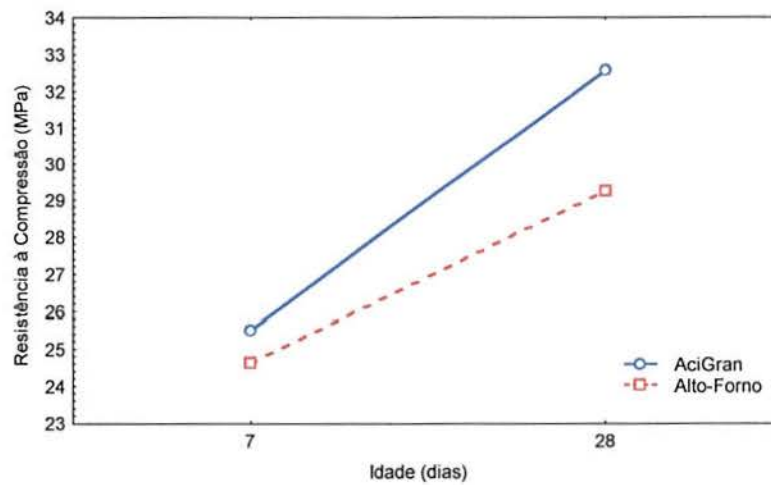
Esta diferença entre os resultados pode estar associada à diferença de granulometria entre as mesmas ( $\phi_{\text{alto-forno}} = 31,17\mu\text{m}$ ;  $\phi_{\text{ACIGRAN}} = 4,83\mu\text{m}$ ), porém cabe ressaltar que o critério para o estudo comparativo entre estas duas escórias foi o tempo de moagem.

Como a viabilização de uso passa por questões econômicas, estabeleceu-se trabalhar com o mesmo tempo de moagem para as duas escórias. Desta forma, verificou-se que a escória de alto-forno possui uma dureza superior à da ACIGRAN, necessitando esta última um tempo bem inferior para atingir a mesma granulometria que a de alto-forno.

Observa-se nas figuras de 7.23 e 7.24 que ambas escórias apresentam o mesmo comportamento quanto à resistência à compressão.



**Figura 7.22** Resistência à compressão de argamassas em função da escória utilizada

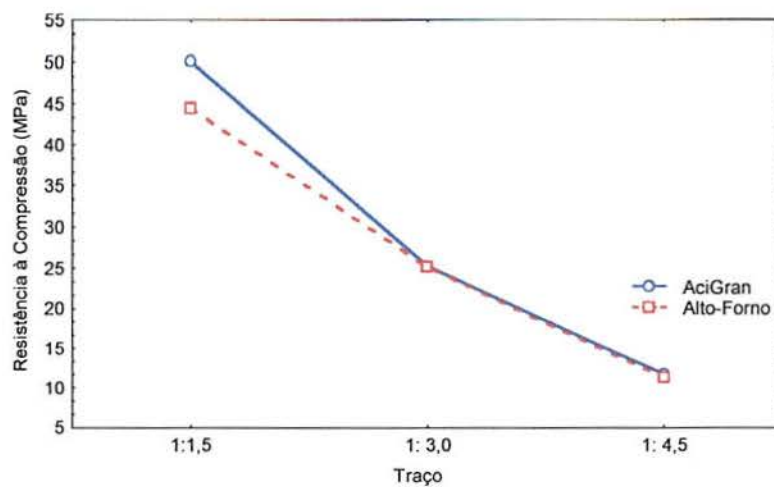


**Figura 7.23** Influência da interação da idade e do tipo de escória na resistência à compressão

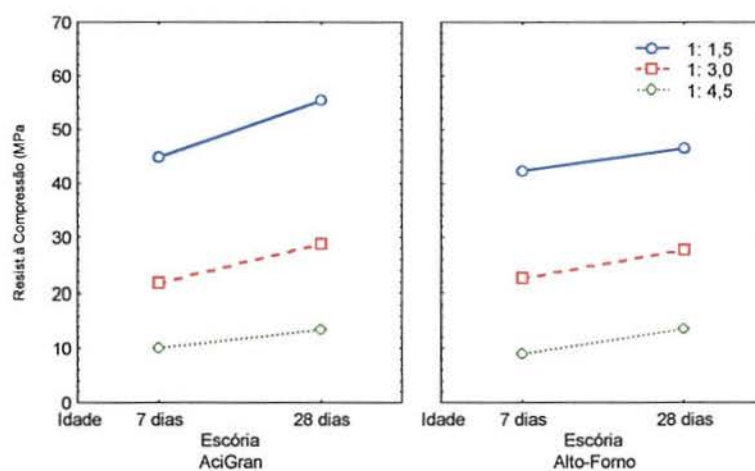
Nos traços mais ricos (figura 7.24) fica evidenciado a contribuição positiva da ACIGRAN no desempenho mecânico das argamassas.

O efeito da interação entre a idade, o traço e o tipo de escória, assim como o traço, o teor e tipo de escória mostraram-se estatisticamente significativos. Estes efeitos estão ilustrados nas figuras 7.25 e 7.26.

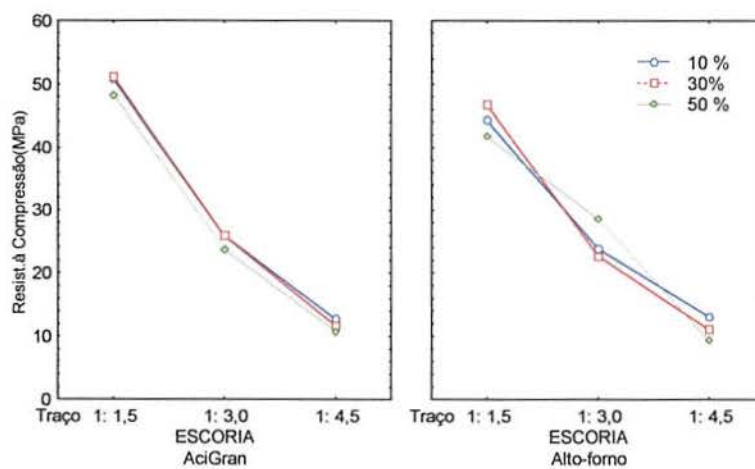




**Figura 7.24** Influência da interação do traço e do tipo de escória na resistência à compressão



**Figura 7.25** Influência da interação da idade, do traço e do tipo de escória na resistência à compressão



**Figura 7.26** Influência da interação do traço, do teor e do tipo de escória na resistência à compressão

A diferença que mais sobressai entre as duas escórias é para o teor de substituição de 50% para o traço intermediário (figura 7.26), onde a resistência à compressão para a escória de alto-forno é superior aos outros dois teores empregados. Com exceção deste, a tendência mostrada pela interação entre as variáveis é a mesma.

### 7.3.5 Conclusões

- A incorporação da escória ACIGRAN em argamassas na forma de substituição ao cimento, do ponto de vista mecânico, mostrou-se eficaz. O uso de teores até 50% não alterou o resultado de resistência à compressão;
- ganho de resistência proporcionada pela ACIGRAN é resultante de suas propriedades hidráulicas e de sua ação filer;
- a quantidade de hidróxido de cálcio não variou com o tempo. Isto ocorreu, provavelmente, por que a quantidade de hidróxido de cálcio total é resultante do hidróxido gerado pelo cimento (em argamassas com ACIGRAN é inferior que as de referência, por ter menor quantidade de clínquer), gerado pela ACIGRAN, pelas suas características hidráulicas e também consumido pela ACIGRAN pela sua característica pozolânica;
- do ponto de vista de resistência à compressão, a ACIGRAN, para o mesmo tempo de moagem, apresentou melhor desempenho que as escórias de alto-forno, cerca de 26 % superior aos 28 dias.

A utilização de ACIGRAN implica em um impacto significativo do ponto de vista econômico, energético e ambiental. O Rio Grande do Sul, no ano de 2000, consumiu aproximadamente 2.000.000 de toneladas de cimento (SINDICATO DO CIMENTO, 2001), de maneira que a indústria cimenteira teria capacidade de absorver até 1.000.000 toneladas, quantia superior à de escória gerada disponível (75.000 toneladas). Portanto, a utilização da ACIGRAN é atrativa tanto do ponto de vista econômico como ambiental.

O preço do cimento Portland no Brasil é de aproximadamente US\$ 100 por tonelada e atualmente a escória de alto-forno granulada é vendida por US\$ 20. Considerando que a escória de aciaria, que hoje é vendida por valor bem inferior a este, agregue valor e atinja o custo da escória de alto-forno, a substituição do clínquer por ACIGRAN implicaria uma redução de no mínimo 40 % do preço do cimento, não considerando a economia referente ao menor consumo energético, que para o cimento é de 1Gjoule, e para os dias de hoje não envolve apenas o custo, mas sim, a carência deste. Do ponto de vista ambiental, o maior impacto é no menor uso de materiais naturais de recursos esgotáveis e a menor emissão de



CO<sub>2</sub>. As indústrias cimenteiras da Europa, em seu plano de contribuir para a redução do CO<sub>2</sub>, considera a adição de resíduos (CEMBUREAU, 2001).

Além dos aspectos abordados, acrescenta-se à importância do uso da ACIGRAN à eliminação dos possíveis efeitos deletérios provocados pela escória em seu estado "in natura".

#### 7.4 CARACTERIZAÇÃO DO PONTO DE VISTA AMBIENTAL DAS ARGAMASSAS

Para as escórias serem adicionadas em materiais cimentícios é necessário a caracterização do ponto de vista de compatibilidade ambiental. Para tanto, foi analisada a argamassa de traço 1: 1,5 com 50% de substituição de cimento por escória quanto à lixiviação (NBR 10005/ 1987) e solubilização (NBR 10006/87). Esta mistura foi a escolhida em função do alto teor de escória presente. Foi analisado o respectivo traço de referência, sem escória.

As tabelas 7.20 e 7.21 apresentam os resultados obtidos do ponto de vista de lixiviação e solubilização<sup>6</sup>.

**Tabela 7.20** Resultados e limites máximos admissíveis do ensaio de lixiviação das argamassas sem e com escórias

Elementos	LIXIVIAÇÃO		
	Referência (1: 1,5) Quantidade	Traço 1:1,5 – 50 % AciGran Quantidade	Limite máximo (mg/l) NBR10005,1987
Arsênio	-		5
Bário	< 1	< 1	100,0
Cádmio	0,03	0,02	0,5
Chumbo	0,14	0,1	5
Cromo	0,10	0,18	5
Fluoreto	0,87	1,8	150,0
Mercúrio			0,1
Prata	0,02	0,01	5,0
Selênio			1,0

Como as argamassa de referência e com ACIGRAN apresentam concentrações dos elementos considerados como perigosos inferior ao limite máximo especificado pelo ensaio de lixiviação (NBR 10005, 1987), estas argamassas são consideradas não perigosas.

A argamassa com ACIGRAN é considerada inerte, por apresentar valores inferiores aos limites máximos dos elementos especificados no ensaio de solubilização (NBR 10006/1987), conforme pode ser visto na tabela 7.21. A argamassa de referência é considerada não inerte.

**Tabela 7.21** Resultados e limites máximos admissíveis do ensaio de solubilização das argamassas sem e com escória ACIGRAN

Elementos	SOLUBILIZAÇÃO		
	Referência (1: 1,5) Quantidade	Traço 1:1,5 – 50 % AciGran Quantidade	Limite máximo (mg/l) NBR10006,1987
Arsênio	-	-	0,05
Alumínio	< 0,20	< 0,20	0,20
Bário	<1,00	< 1,00	1,00
Cádmio	-	-	0,005
Chumbo	< 0,05	< 0,05	0,05
Cianeto	-	-	0,10
Cloreto	1,40	2,10	250,00
Cobre	< 0,02	< 0,02	1,00
Cromo	0,04	0,04	0,05
Dureza	1258	442	500
Fenol	-	-	0,001
Ferro	< 0,03	< 0,03	0,30
Fluoreto	0,03	0,16	1,50
Manganês	0,03	0,03	0,10
Merúrio	-	-	0,001
Nitratos	-	-	10,00
Prata	< 0,01	< 0,01	-
Selênio	-	-	-
Sódio	57	88	200
Sulfato	250	109	400
Surfactantes	-	-	0,20
Zinco	< 0,01	< 0,01	5,00

## 7.5 DURABILIDADE DAS ARGAMASSAS

Além do desempenho mecânico, a incorporação de ACIGRAN deve proporcionar às argamassas durabilidade igual ou superior a de referência.

Quatro foram as propriedades escolhidas para avaliar as argamassas com ACIGRAN quanto à durabilidade, quais sejam:

- **Absorção de água:** A durabilidade dos concretos e argamassas é fortemente influenciada pela penetração da água que, além de dissolver compostos presentes na pasta endurecida, pode ter sua fase hidratada atacada por agentes agressivos presentes na água (MASSAZA e COSTA, 1993).
- **Ataque por Cloretos:** O contato com água do mar, atmosferas marinhas, lavagem de fachadas e atmosferas industriais pode dar origem à penetração de cloretos em estruturas de concreto (HELENE, 1993). Estes cloretos, ao atingirem as armaduras, desencadeiam o processo de corrosão das mesmas.

<sup>6</sup> Ensaios realizados pelo Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia/ UFRGS.



- **Carbonatação:** Esta propriedade é importante uma vez que em concretos armados, a barra de aço está protegida contra a corrosão pelo concreto, resultante de uma proteção física e química. A primeira, decorrente de uma espessura adequada para evitar a penetração de agentes agressivos. A segunda, resultante da alta alcalinidade do concreto que mantém uma película passivadora de óxido de ferro que se forma adjacente à barra. A diminuição do pH gerará a destruição rápida desta camada e o processo de corrosão se desenvolverá rapidamente (De CEUKELAIRE e NIEUWENBURG, 1993).
- **Ataque por Sulfatos:** Os sulfatos são encontrados, comumente, em águas subterrâneas, água do mar e esgotos industriais. Na penetração destes íons nas argamassas e concretos, ocorrem reações entre estes e alguns constituintes no cimento hidratado, levando à fissuração da matriz e à perda de resistência e desintegração (IRASSAR, 1990).

### 7.5.1 Absorção de Água

A penetração de água para o interior das pastas de cimento ocorre devido à sucção capilar ou permeabilidade (SEEHRA et al., 1993). O primeiro é consequência de movimentos capilares nos poros do concreto, parcialmente secos, abertos ao meio ambiente (NEVILLE, 1997) e o segundo ocorre pela penetração da água sob pressão, sendo caracterizada por um gradiente hidráulico que força a entrada da água no concreto (SILVA FILHO, 1994).

A absorção de água, neste programa experimental, foi avaliada através de dois métodos: Método KELHAM (não normalizado) e Absorção por Imersão (NBR 9778, 1990).

Para tanto foram moldados corpos-de-prova com iguais teores de substituição (0, 10, 30 e 50%) e traços (1: 1,5, 1:3,0 e 4,5) aos utilizados para avaliação da resistência à compressão.

#### 7.5.1.1 Ensaio de penetração por sucção capilar

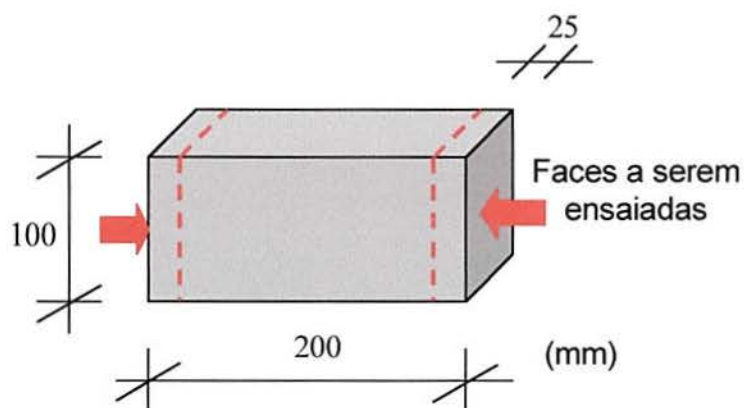
O ensaio foi realizado conforme preconizado por KELHAM (1988), no qual avalia-se a penetração de água por sucção capilar ao longo do tempo. Apesar de não normalizado, este ensaio foi escolhido, pelo fato da absorção de água por sucção capilar ao longo do tempo ser considerada uma estimativa adequada para a durabilidade de um concreto (PARROT, 1992) e por ter-se mostrado eficiente para esta avaliação por uma série de pesquisadores (BARATA, 1998; FERREIRA, 2000; MOURA, 2000; GONÇALVES, 2000; SILVA FILHO, 2001; SOUZA, 2001).

#### 7.5.1.1.1 *Preparo do corpo-de-prova*

Inicialmente foram confeccionados corpos-de-prova prismáticos de dimensões 100 x 100 x 150 mm. Para cada combinação de variáveis confeccionou-se dois exemplares. Nas primeiras 24 horas, os corpos-de-prova permaneceram cobertos, em ambiente de laboratório, sendo posteriormente desmoldados e colocados em câmara úmida com umidade superior a 95% e temperatura  $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$ , até completarem 28 dias de idade.

Nesta data, os corpos-de-prova foram removidos da câmara úmida e serrados, no sentido da menor dimensão, com o auxílio de uma serra de corte diamantado, de forma a obter novos corpos-de-prova de dimensão (100 x 100 x 25) mm, conforme ilustrado na figura 7.27 e 7.28.

A espessura de 25 mm seguiu a adaptação feita por GOPALAN (1988) ao método, onde a espessura inicial proposta era de 50mm, com o objetivo de diminuir o tempo de ensaio.



**Figura 7.27** Desenho esquemático da origem dos corpos-de-prova de prova a serem submetidos ao ensaio de sucção capilar



**Figura 7.28** Corpos-de-prova obtidos a partir do corte dos prismas de 100 x 100 x 150 mm



O ensaio foi realizado com uma fatia de cada corpo-de-prova. Na necessidade da repetição, no caso da entrada de água devido a falha no sistema de vedação, o segundo corpo-de-prova de cada exemplar era ensaiado.

Os corpos-de-prova foram deixados secar em ambiente de laboratório por aproximadamente 1 hora, com o objetivo de perder parte da água absorvida na serragem. Após este período foram pesados e colocados em estufa a  $110 \pm 10^{\circ}\text{C}$ , até atingirem constância de massa ( 0,1 % da massa, em períodos de pesagem de aproximadamente 24 horas).

Procedeu-se o resfriamento dos corpos-de-prova em recipiente com sílica gel, de modo a manter a umidade baixa, menos de 0,1 % da massa de quando foi removido da estufa.

Uma vez secos, foram tomadas as medidas da espessura e da área que ficariam em contato com a água, as quais são necessárias para a determinação da taxa de absorção e resistência capilar.

Feito este levantamento, procedeu-se, inicialmente, a impermeabilização das faces laterais com materiais à base de epóxi. Os cantos foram reforçados, pois são pontos críticos de penetração de água. Na parte superior da face lateral deixou-se um excesso de material impermeabilizante para servir de apoio para placa que é colocada sobre ele, tendo sempre o cuidado para não passar selante na face superior ou naquela em contato com água (figura 7.29).



**Figura 7.29** Impermeabilização das faces laterais dos corpos-de-prova

A face ensaiada, ou seja, aquela em contato com água, foi a adjacente à fôrma no momento da moldagem, simulando uma situação real, e não a gerada por ocasião do corte.

Na face oposta, sobre o excesso do material impermeabilizante das faces laterais, posicionou-se uma placa de PVC (canto esquerdo inferior da figura 7.29) com um cano plástico transparente de 2mm, com vistas a garantir que uma das faces permanecesse em contato com ar. Esta placa foi fixada ao corpo-de-prova através de material selante, formando assim uma pequena câmara de ar na parte superior do corpo-de-prova.

O ensaio deve iniciar o mais próximo do término do preparo do corpo-de-prova, porém na impossibilidade, os mesmos devem ser dispostos em uma estufa a baixa temperatura ( $40 \pm 2^\circ\text{C}$ ), para não absorver umidade.

#### 7.5.1.1.2 REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Para realização do ensaio foi utilizada uma balança marca MARTHE, com precisão de centésimo de grama, um dispositivo composto de uma cesta sobre a qual posicionou-se o corpo-de-prova submerso em água e um apoio na balança para sustentar a cesta.

Este sistema foi montado sobre uma caixa com água, cujo nível foi mantido durante todo o ensaio, como pode ser visualizado na figura 7.30.

O corpo-de-prova foi colocado em água e feitas leituras após (2, 5, 10, 15, 30) min e (1, 2, 3, 6, 12, 24, 48, 72 e 96) h.

Uma vez iniciado o ensaio o corpo-de-prova não pode ser removido de dentro da água.

O ensaio é prosseguido até a saturação total do corpo-de-prova.

Ao graficar-se o ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo, observa-se duas fases distintas, para as quais é possível interpolar-se duas retas. A primeira atribui-se a absorção inicial de água e a segunda de saturação. A intersecção destas duas retas é um ponto denominado ponto de saturação ou "nick point", a partir do qual inicia-se a saturação do corpo-de-prova.

A taxa de absorção, em  $\text{g}/\text{cm}^2\text{h}^{1/2}$ , é calculada pelo quociente da inclinação da reta referente à fase de absorção pela área efetiva do corpo-de-prova.

A resistência capilar é determinada pela razão entre o ponto de saturação e a espessura do corpo-de-prova, como expresso na equação 7.1 (GJORV, 1994).

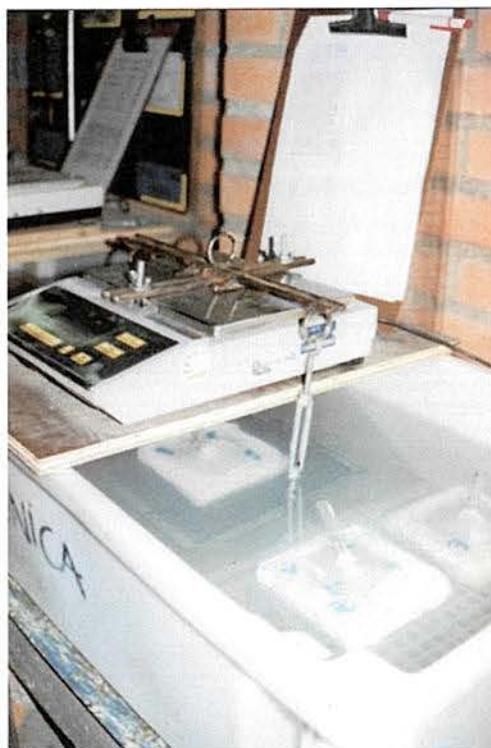
$$R = \left( \frac{t_{cap}}{e} \right)^2 \quad 7.1$$

onde R: Resistência química ( $\text{h}/\text{m}^2$ )

$t_{cap}$  : abscissa do ponto de saturação ( $\text{h}^{1/2}$ )

e: espessura do corpo-de-prova (m)





**Figura 7.30** Dispositivo do ensaio de sucção capilar

#### 7.5.1.1.3 Apresentação dos resultados

A tabela 7.22 resume os resultados obtidos no ensaio de sucção capilar. O ganho de massa ao longo do tempo encontram-se no anexo 4.

**Tabela 7.22** Taxas de absorção e resistências capilares de argamassas com ACIGRAN

Traço	Teor ACIGRAN (%)	Relação a/agl	Taxa (g/cm <sup>2</sup> h <sup>½</sup> x10 <sup>-2</sup> )	Taxa Média (g/cm <sup>2</sup> h <sup>½</sup> x10 <sup>-2</sup> )	Resistência Capilar (h/m <sup>2</sup> )	Resistência Capilar Média (h/m <sup>2</sup> )
1:1,5	0	0,33	1,47	1,89	87479	76061
			2,30		64644	
	10	0,32	1,56	1,37	91809	77918
			1,18		64028	
	30	0,31	1,62	1,83	105528	84055
			2,03		62583	
	50	0,31	1,50	1,61	101478	86023
			1,72		70569	
1: 3,0	0	0,53	12,28	11,47	15920	18261
			10,63		20603	
	10	0,52	8,82	8,75	27063	32156
			8,68		37249	
	30	0,51	7,28	6,21	44518	46509
			5,14		48501	
	50	0,51	6,66	4,86	43926	73606
			3,06		103286	
1:4,5	0	0,80	23,69	19,46	5135	8636
			15,23		12138	
	10	0,77	21,50	15,38	6149	12576
			9,25		19004	
	30	0,77	22,80	15,26	4046	21837
			7,72		39629	
	50	0,75	21,11	14,04	5387	25512
			6,96		45637	

#### 7.5.1.2 Análise e discussão dos resultados

Analisando os resultados obtidos tanto na taxa de absorção como para resistência capilar, verifica-se que há uma grande variabilidade nos resultados, também encontrado por GONÇALVES (2000) ao estudar concretos com adição de resíduo de corte de granito. Apesar que outros pesquisadores, estudando distintas adições, obtiveram baixa variabilidade (MOURA, 2000, MASUERO, 2001, FREITAS, 2001).

A variabilidade do presente estudo deve-se, provavelmente, às duas séries terem sido realizado em temperaturas médias muito distintas, de 21° C e 9° C, uma vez que não foram realizados em ambiente climatizado.

Apesar dos valores entre os dois exemplares apresentarem diferenças entre si, o comportamento dentro de cada série foi o mesmo, de forma que realizou-se a análise estatística com todos os valores.



As tabelas 7.23 e 7.24 apresentam a análise de variância realizada para a taxa de absorção e resistência capilar.

**Tabela 7.23** Resultados da análise estatística através da ANOVA da taxa de absorção por sucção capilar das argamassas com ACIGRAN

FATOR	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância*
Traço	2	415,2443	14,856	3,89	S
Teor	3	18,4557	0,660	3,49	NS
Traço x Teor	6	4,8872	0,175	3,00	NS
Erro	12	27,949			

**GDL:** Grau de Liberdade

**MQ:** Média Quadrática

**Fcalc:** Valor calculado de F

**F0,05:** Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

**S:** Significativo

**NS:** Não Significativo

**\*Significância:** Fcalc > F0,05 : S

Fcalc < F0,05 : NS

**Tabela 7.24** Resultados da análise estatística através da ANOVA da resistência capilar das argamassas com ACIGRAN

FATOR	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância*
Traço	2	91504x10 <sup>4</sup>	23,7069	3,89	S
Teor	3	28587x10 <sup>3</sup>	0,7406	3,49	NS
Traço x Teor	6	10144x10 <sup>3</sup>	0,2628	3,00	NS
Erro	12	38598x10 <sup>3</sup>			

**Gdl:** Grau de Liberdade

**MQ:** Média Quadrática

**Fcalc:** Valor calculado de F

**F0,05:** Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

**S:** Significativo

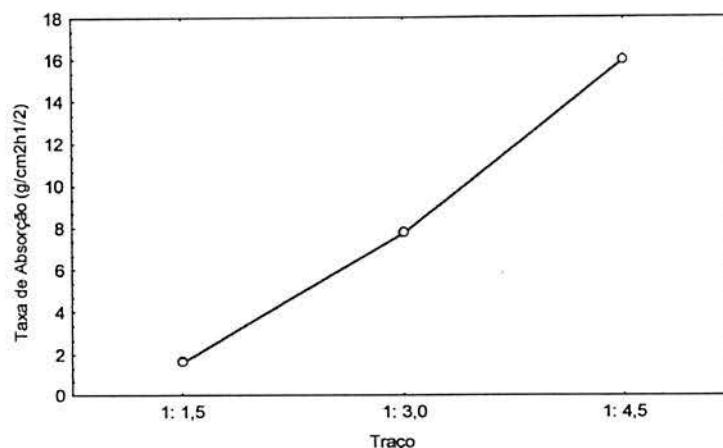
**NS:** Não Significativo

**\*Significância:** Fcalc > F0,05 : S

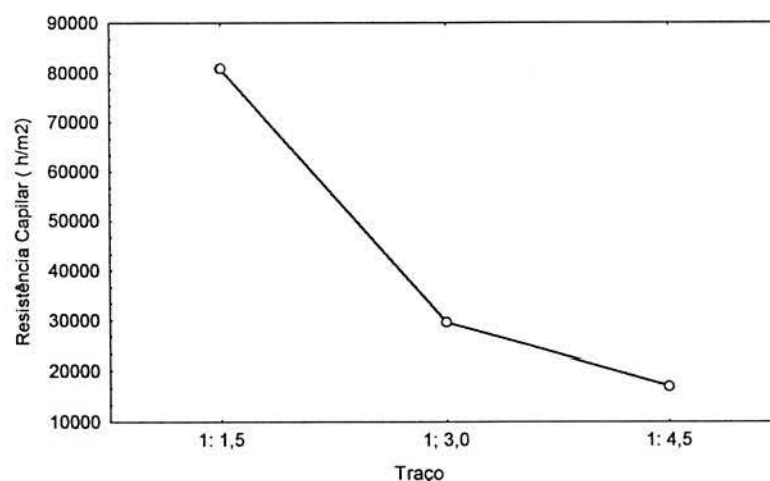
Fcalc < F0,05 : NS

A análise estatística resultante mostra, da mesma forma que para resistência à compressão, que a única variável que apresentou influência significativa na taxa de absorção e a resistência capilar foi o traço, como pode ser visualizado nas figuras 7.31 e 7.32, onde verifica-se que a taxa de absorção é inversamente proporcional e a resistência capilar proporcional ao aumento do consumo de cimento, ou seja, à redução da relação água/aglomerante.

A ACIGRAN, por atuar como pontos de nucleação, proporciona a formação de compostos hidratados que se distribuem formando uma rede capilar descontínua, além de funcionar como agente de refinamento físico e químico da estrutura, apresentando assim os mesmos níveis de taxa de absorção e resistência capilar que as argamassas de referência.



**Figura 7.31** Efeito do traço na taxa de absorção das argamassas



**Figura 7.32** Efeito do traço na resistência capilar das argamassas

Esta ação benéfica causada pela incorporação da ACIGRAN, não se verifica para escórias de alto-forno em argamassas e concretos. HO et al. (1986) em estudos em concretos com cimento com 35% de substituição por escória de alto-forno e em dois níveis de resistência, 28 MPa e 38 MPa, verificaram que a baixas idades há um aumento absorção por sucção capilar para os concretos com adição de escórias.

BAUER (1995) confirmou este comportamento, em concretos produzidos com cimento com 24% de escória de alto-forno. Foi observado que à medida que aumenta a relação a/c diminui a diferença dos valores obtidos entre as séries que utilizam cimento com adição e sem adição, podendo atribuir este comportamento às características de refinamento de poros.

A diferença do efeito da incorporação da ACIGRAN e de escórias de alto-forno em argamassas está associada provavelmente à alta reatividade, desde as primeiras idades, conforme exemplificado na figura 7.12, decorrente do elevado índice de atividade pozolânica e finura da ACIGRAN.



A contribuição dada pela incorporação de adições para minimizar a taxa de absorção, como decorrência de um efeito físico, pode ser bastante significativa, como identificaram MOURA (2000) e ALVES (2000).

MOURA (2000) verificou que a adição de 20 % de escória de cobre como adição ao concreto propicia uma menor taxa de absorção para os 3 níveis de resistência analisados, correspondentes as relações água/cimento 0,4, 0,5 e 0,6, obtendo uma redução de até 24 % para relações a/c 0,60. Este resultado, segundo o referido autor, deve-se ao efeito fíler devido a uma melhor distribuição e preenchimento de vazios.

ALVES (2000) avaliou misturas ternárias de cinza de casca de arroz e cinza volante em teores de até 50 %, em concretos com relações a/c variando de 0,2 a 0,8. Encontrou que quanto maior o teor de adição, menor a absorção de água. Segundo o referido autor, os materiais pozolânicos funcionaram como tamponamento e segmentação dos poros.

Este efeito físico também é observado nas argamassas com ACIGRAN, sendo responsável, em parte, pela estrutura densa (figuras 7.17 e 7.18) destas argamassas como decorrência da atuação da ACIGRAN como fíler ( $\phi_{ACIGRAN} = 4,83\mu m$ ).

## **7.5.2 Ensaio de Absorção por Imersão (NBR 9878 , 1990)**

### **7.5.2.1 Descrição do ensaio**

Este ensaio é utilizado como indicativo do volume total de poros.

Ao final de 28 dias de cura, os corpos-de-prova foram submetidos aos procedimentos prescritos na NBR 9878 (1990) para realização do ensaio de absorção por imersão.

Para realização do ensaio foram confeccionados 3 corpos-de-prova de cada combinação de variáveis analisadas no ensaio de sucção capilar. Os mesmos foram secos em estufa durante 72 horas, com pesagem diárias e após colocados em imersão com água a 1/3 nas primeiras 4 horas, 2/3 nas 4 horas subseqüentes e imersão completa nas 64 restantes (figura 7.33).



**Figura 7.33** Corpos-de-prova em imersão total – Ensaio de absorção por imersão

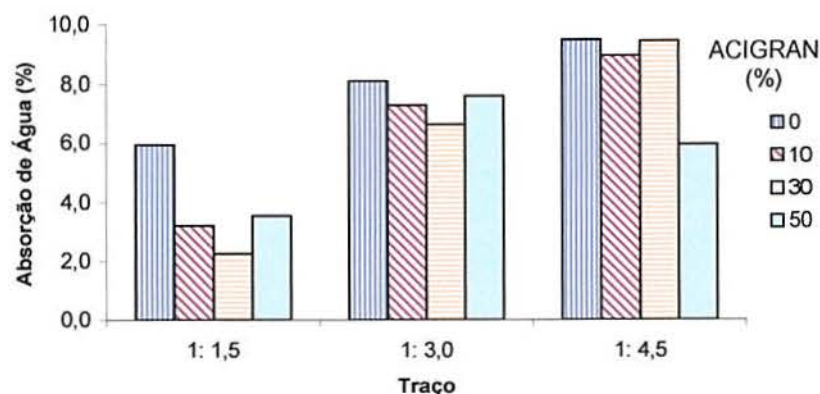
#### **7.5.2.2 Apresentação dos resultados**

A tabela 7.25 e as figuras 7.34 e 7.35 ilustram os resultados obtidos quanto à absorção por imersão e índice de vazios (NBR 9678, 1990).

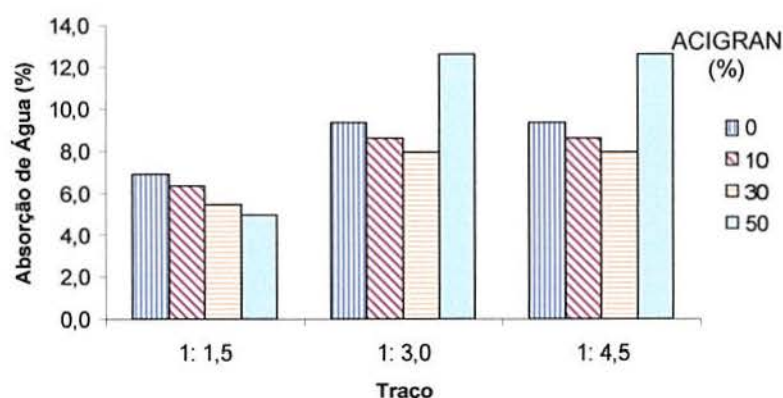


**Tabela 7.25** Absorção por imersão e índice de vazios (NBR 9878, 1990)

<b>Traço</b>	<b>Teor ACIGRAN(%)</b>	<b>Absorção (%)</b>	<b>Média Absorção(%)</b>	<b>Média Índice de Vazios</b>
1: 1,5	0	5,61	5,94	13,9
		5,85		
		6,37		
	10	3,33	3,2	7,07
		2,85		
		3,44		
	30	2,33	2,27	5,03
		1,51		
		2,96		
	50	3,52	3,55	7,9
		3,33		
		3,80		
1: 3,0	0	8,11	8,14	16,43
		8,13		
		8,17		
	10	7,38	7,31	15,31
		7,27		
		7,27		
	30	5,51	6,62	13,95
		7,16		
		7,20		
	50	8,44	7,60	15,91
		7,17		
		7,18		
1: 4,5	0	9,57	9,49	19,20
		9,34		
		9,56		
	10	9,23	8,96	17,84
		9,18		
		8,47		
	30	9,50	9,44	19,17
		9,51		
		9,32		
	50	9,58	9,59	19,10
		9,64		
		9,54		



**Figura 7.34** Absorção por imersão (NBR 9878, 1990)



**Figura 7.35** Índice de vazios após imersão (NBR 9878, 1990)

### 7.5.2.3 Análise e discussão dos resultados

A tabela 7.26 apresenta os resultado da análise estatística do efeito das variáveis sobre a absorção por imersão.

**Tabela 7.26** Resultados da análise estatística através da ANOVA da absorção por imersão das argamassas com ACIGRAN

FATOR	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância*
Traço	2	98,4949	472,3123	3,40	S
Teor	3	4,97853	23,8724	3,01	S
Traço x Teor	6	1,90380	9,1289	2,51	S
Erro	24	0,208			

**GDL:** Grau de Liberdade

**MQ:** Média Quadrática

**Fcalc:** Valor calculado de F

**F0,05:** Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

**S:** Significativo

**NS:** Não Significativo

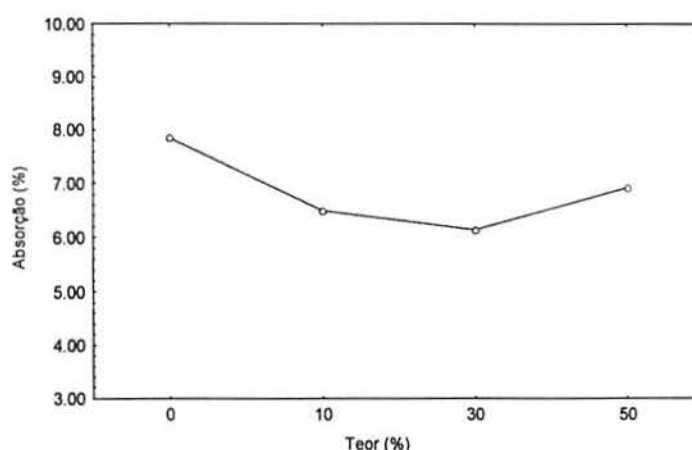
**\*Significância:** Fcalc > F0,05 : S

Fcalc < F0,05 : NS

Verifica-se a influência estatisticamente significativa do traço e do teor, assim como uma interação entre os dois fatores na absorção por imersão.

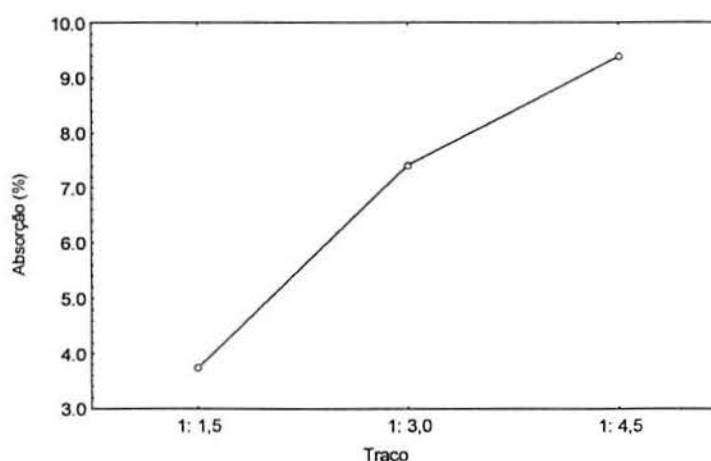


A presença da ACIGRAN exerce uma influência positiva diminuindo a absorção, como pode ser visto na figura 7.36, apesar de se observar um aumento da absorção quando do aumento do teor de 30 para 50 %. Entretanto, os níveis de absorção permanecem inferiores aos da argamassa de referência. Este acréscimo da absorção pode ser decorrente da variabilidade intrínseca ao ensaio, no que diz respeito à evaporação da água absorvida e alteração do nível da lâmina d'água. Ressalta-se que o comportamento observado para este ensaio foi contraditório ao encontrado para os ensaios de resistência à compressão e absorção por sucção capilar, método Kelham, onde para ambos os ensaios a única variável que apresentava influência significativa foi o traço, reforçando assim a possível influência da variabilidade do ensaio.



**Figura 7.36** Comportamento das argamassas quanto a absorção por imersão em função dos diferentes teores de escórias ACIGRAN

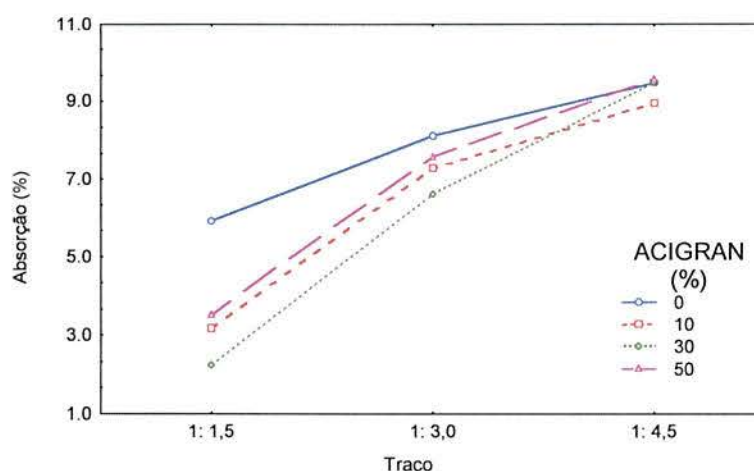
A figura 7.37 mostra o efeito do traço na absorção de água por imersão.



**Figura 7.37** Absorção por imersão de argamassas em função do proporcionamento dos materiais

Analisando a interação do traço com o teor de substituição, ilustrada na figura 7.38, fica evidenciada uma melhora significativa na propriedade da absorção por imersão, principalmente para os traços mais ricos, onde se tem uma grande quantidade de

ACIGRAN. Sendo assim, no traço 1: 4,5, onde o consumo de cimento é menor, e conseqüentemente de ACIGRAN, praticamente não se verifica melhora no desempenho pela incorporação da ACIGRAN. À medida que vai-se aumentando o consumo de cimento, as diferenças ficam mais evidenciadas. Cabe ressaltar, que este comportamento não foi o mesmo observado para outras propriedades (resistência à compressão e absorção pelo método Kelham).



**Figura 7.38** Interação do teor de ACIGRAN e traço na absorção por imersão de argamassas

O teor de 30 % de ACIGRAN proporciona menor absorção para os dois traços de maior consumo de cimento, cerca de 62% menor do que o referência, para o traço 1: 1,5 e de 19 %, em relação ao referência, para o traço 1: 3,0. Quando utilizado 50% de substituição, houve uma redução na taxa de absorção de 40 % para o traço 1: 1,5 e de 7 % para o traço 1:3,0. Estas diferenças na redução da absorção pode ter sido conseqüência da variabilidade do ensaio ou das partículas, no caso do teor de 50%, por serem muito finas, terem-se aglomerado, e não terem proporcionado uma rede capilar de dimensões tão adequada quanto a formada por 30 % de ACIGRAN.

Realizou-se uma comparação múltipla de médias para cada teor, pelo método de Duncan, para verificar se os resultados obtidos variam entre si. A análise consiste em calcular o desvio padrão da análise em função da média quadrada do erro e dos graus de liberdade, com os valores fornecidos pela ANOVA. Se a diferença entre as médias for superior a três desvios é que existe diferença significativa entre as médias.

Com base nesta análise, para o traço 1: 1,5 os teores diferem significativamente entre si, com exceção do teor de 10 e 50 % de substituição.

Para o traço 1: 3,0 não existe diferenças significativa entre as médias e para o traço de 1: 4,5; verifica-se que efetivamente o teor de 10% diminuiu a absorção, apresentando resultados estatisticamente diferente dos demais.



Analisando-se estatisticamente a influência do teor de ACIGRAN, traço, e a interação entre ambas variáveis no índice de vazios das argamassas, verifica-se que não há influência significativa por parte das mesmas, conforme está indicado na tabela 7.27.

**Tabela 7.27** Resultados da análise estatística através da ANOVA do índice de vazios após imersão das argamassas com ACIGRAN

FATOR	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância*
Traço	2	222,5035	-	-	NS
Teor	3	16,3435	-	-	NS
Traço x Teor	6	7,9417	-	-	NS
Erro	12	0,208			

GDL: Grau de Liberdade

MQ: Média Quadrática

Fcalc: Valor calculado de F

F0,05: Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

S: Significativo

NS: Não Significativo

\*Significância: Fcalc > F0,05 : S

Fcalc < F0,05 : NS

### 7.5.3 Conclusões sobre os resultados de absorção de água

Quanto ao ensaio de sucção capilar, o teor de substituição não influencia na taxa de absorção e nem na resistência capilar, podendo ser empregado até 50% sem prejuízo no desempenho quanto à absorção de água, sendo este teor economicamente mais interessante. Este comportamento foi o mesmo encontrado para a resistência à compressão.

Quanto à absorção por imersão, esta propriedade foi influenciada pelo teor de substituição, existindo também interação entre o traço e o teor. Este resultado, que não se encontra em consonância com os anteriores, pode ter sido influenciado pela variabilidade intrínseca do ensaio.

Quanto ao índice de vazios, não houve influência estatisticamente significativa do teor de substituição e do traço, nem da interação das mesmas nesta propriedade.

### 7.5.4 Ataque por Cloretos

A durabilidade frente à ação de íons cloretos foi avaliada através do coeficiente de difusão, por ser este um dos parâmetros mais adequados para avaliação desta propriedade (CABRAL, 2000; GJORV, 1994).

Para a determinação do coeficiente de difusão lançou-se mão do ensaio de migração de cloretos proposto por ANDRADE et al. (1993).

Este ensaio consiste basicamente na aplicação de uma diferença de potencial entre duas câmaras, uma com e outra sem cloretos. Eletrodos posicionados em cada câmara dão origem a uma corrente que induz à migração dos íons cloretos, através de um corpo-de-

prova de argamassa posicionada entre duas câmaras com diferentes concentrações de cloretos.

A câmara negativa é constituída de solução de NaCl 0,5 M (ANDRADE et al, 1993) e a câmara positiva de água destilada. Esta última foi montada de acordo com a utilizada por CABRAL (2000) e BAUER (1995), os quais confeccionaram a câmara de conexões e tubos de PVC, de forma a permitir o uso de várias câmaras positivas para uma única fonte e câmara negativa.

A câmara positiva foi confeccionada com tubos e conexões de água de 100mm de diâmetro. Com exceção destes dois, para permitir o reaproveitamento da câmara, todas as outras juntas foram soldadas com adesivo plástico.

A figura 7.39 mostra esquematicamente a montagem do ensaio.

Foram colocadas 6 câmaras positivas dentro da câmara negativa. Para imprimir a diferença de potencial utilizou-se uma fonte de 10 V, a qual foi ligada a eletrodos, confeccionados por barras de aço inoxidável ABNT 304, de diâmetro  $\frac{1}{4}$ ", colocados em cada câmara positiva e a uma chapa inoxidável posicionada na câmara negativa.

Para evitar a penetração da solução pela junta entre o "caps" que contém o corpo-de-prova e o tubo, vedou-se com selante a base de poliuretano.



**Figura 7.39** Posicionamento das seis câmaras positivas dentro da negativa, com fonte de tensão ligada a chapa de aço inoxidável e eletrodos

#### **7.5.4.1 Equipamentos**

##### 7.5.4.1.1 Análise de Cloretos

Os equipamentos utilizados para análise de cloretos foram um medidor de potencial (íon analisador) DIGIMED, modelo DM-21, um eletrodo de íon-seletivo ao cloreto marca ANALION, modelo CL651, um eletrodo de referência com junção dupla, com compartimento externo preenchido com nitrato de sódio (Eletrodo Ag/AgCl, modelo R-684A, marca ANALION) e um agitador magnético, os quais estão apresentados na figura 7.40.





**Figura 7.40** Equipamentos utilizados para determinação da quantidade de cloretos (agitador eletromagnético, eletrodos de referência, íon seletivo ao cloreto e condensador e íon analisador, da esquerda para direita)

#### **7.5.4.2 Preparação da amostra - Procedimentos de ensaio**

Os corpos-de-prova para este ensaio foram obtidos a partir de corpos-de-prova cilíndricos de argamassa (50 x 100 mm) de 3 traços distintos (1: 1,5; 1:3,0; 1:4,5) e 4 teores de substituição de escória ACIGRAN (0, 10, 30 e 50 %).

Completados 28 dias de cura em ambiente com umidade superior a 95% e temperatura  $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$ , cada corpo-de-prova foi serrado com serra de corte diamantada de forma a retirar uma fatia de 10 mm de espessura da parte central, a qual constituirá no novo corpo-de-prova do ensaio de migração. Esta espessura foi determinada em função de alcançar um estado estacionário em um curto período de tempo, iniciando posteriormente um fluxo linear de cloretos ao longo do tempo. Esta espessura já foi empregada por CABRAL (2000), BAUER (1995) e ANDRADE (1994).

Após o corte os mesmos foram pesados e colocados em estufa a  $110 \pm 10^\circ \text{C}$ , até atingirem constância de massa (0,1 % da massa, em períodos de pesagem de aproximadamente 24 horas).

Uma vez secas, as fatias foram tiradas da estufa e deixadas para resfriar em recipiente com sílica gel, de modo a não absorver umidade acima a 0,1 % da massa de quando foi removido da estufa. No caso de ocorrer, o corpo-de-prova deveria retornar à estufa.

Inicialmente, procedeu-se a impermeabilização da superfície lateral dos corpos-de-prova, com material à base de epóxi.

Cada fatia de argamassa deve ser posicionada na extremidade da câmara positiva que ficará em contato com a solução de cloreto de sódio. Deve ser passado selante entre o corpo-de-prova e a câmara, bem como nas juntas, para garantir que o único caminho de

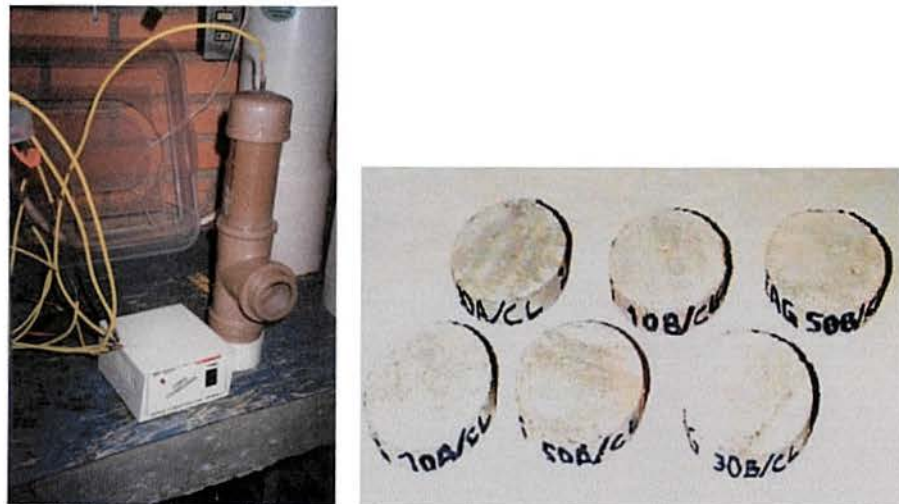
passagem de solução se dê pela argamassa, tendo cuidado para que não tenha selante sobre as faces do corpo-de-prova, o que poderia distorcer os resultados, devido a uma minimização da superfície de passagem de solução.

Uma vez montada a célula positiva, efetuou-se o enchimento da mesma, controlando o volume de água deionizada colocada. Posteriormente, preparou-se a solução de 0,5 M NaCl na câmara negativa e aplicou-se a diferença de potencial.

Após as primeiras 24 h, iniciou-se a coleta da amostra. Nos três primeiros dias de ensaio foram removidos, do interior da câmara positiva, 3ml de solução, as quais posteriormente foram analisadas quanto à quantidade de cloretos existentes. No período restante eram coletadas amostras, na mesma quantidade, duas vezes ao dia.

Como parâmetro de controle da passagem de íons, foi colocada uma resistência ôhmica de  $1\Omega$  nos fios que ligam a câmara positiva à fonte para medição da corrente. No momento de cada coleta de amostra era feita leitura da corrente (anexo 5).

As figuras 7.41 e 7.42 ilustram os corpos-de-prova antes do preparo e prontos para serem ensaiados



**Figura 7.41** (a) Dispositivo e (b) corpo-de-prova para o ensaio de migração de cloretos



**Figura 7.42** (a) Corpo-de-provas já posicionados na câmara positiva prontos para serem ensaiados



O método de análise de cloretos foi o de potenciometria direta.

As figuras com a evolução da concentração de cloretos nas argamassas de traços 1: 1,5, 1:3,0 e 1: 4,5, ao longo do tempo encontram-se no anexo 5.

O cálculo da difusão de íons se dá pela equação 7.2 (ANDRADE, 1993) :

$$D = \frac{JRT\ell}{zFC\Delta E} \quad (7.2)$$

onde :

D : Coeficiente efetivo de difusão (cm<sup>2</sup>/s);

R : constante dos gases ( 1,9872 cal/mol/kelvin)

F : constante de Faraday ( 23063 cal/ volt/eq)

z : carga elétrica ( para cloretos = a 1)

J : Fluxo de íons ( mol/ s/cm<sup>2</sup>)

T : Temperatura (kelvin)

ℓ : espessura do corpo-de-prova (cm)

C : atividade inicial dos íons cloretos (mol/cm<sup>3</sup>)

Para o cálculo do coeficiente de difusão foram usados os seguintes parâmetros específicos ao ensaio:

ΔE = 12 volts;

ℓ = 1,0 cm

Ccl= 0,5 M

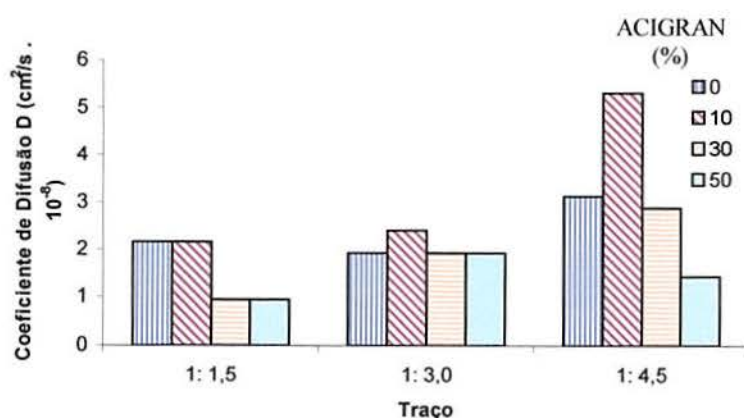
A = 15,896 cm<sup>2</sup> (área exposta)

A determinação do fluxo de íons (J) é feita a partir do gráfico da concentração de íons cloretos na câmara positiva versus tempo, no estado estacionário. Quando este for atingido, a concentração dos cloretos através do tempo seguirá uma tendência linear, onde a inclinação da reta dada pelo gráfico é o fluxo de íons (J).

A tabela 7.28 apresenta o fluxo de íons e os respectivos coeficientes de difusão. O coeficiente de difusão pode ser visualizado na figura 7.43.

**Tabela 7.28** Coeficientes de difusão de argamassas com adição ACIGRAN

Traço	Teor ACIGRAN (%)	a/ (c+e)	Inclinação		J(mol/s/cm <sup>2</sup> x 10 <sup>-9</sup> )	D (cm <sup>2</sup> /s x 10 <sup>-8</sup> )
1: 1,5	0	0,33	0,0003	0,00045	7,8634	2,168
			0,0006			
	10	0,32	0,0002	0,00045	7,8634	2,168
			0,0007			
	30	0,31	0,0002	0,0002	3,4948	0,9636
			0,0002			
	50	0,31	0,0002	0,0002	3,4948	0,9636
			0,0002			
1: 3,0	0	0,53	0,0003	0,0004	7,8634	1,927
			0,0005			
	10	0,52	0,0005	0,0005	8,7372	2,409
			0,0005			
	30	0,51	0,0003	0,0004	6,9897	1,927
			0,0005			
	50	0,51	0,0004	0,0004	6,9897	1,927
			0,0004			
1: 4,5	0	0,80	0,0006	0,00065	1,1358	3,131
			0,0007			
	10	0,77	0,0007	0,0011	1,9221	5,299
			0,0015			
	30	0,77	0,0005	0,0006	1,0484	2,890
			0,0007			
	50	0,75	0,0002	0,0003	5,2423	1,445
			0,0004			



**Figura 7.43** Coeficiente de difusão de argamassas com ACIGRAN

#### 7.5.4.3 Análise e discussão dos resultados

Buscando-se verificar a influência do traço e do teor no coeficiente de difusão foi realizada a análise de variância, cujos resultados constam na tabela 7.29.



**Tabela 7.29** Resultados da análise estatística através de análise de variância (ANOVA) do coeficiente de difusão

FATOR	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância*
Traço	2	5,5600	5,0087	3,89	S
Teor	3	3,7214	3,35	3,49	NS
Traço x Teor	6	1,2079	1,088	3,00	NS
Erro	12	1,11			

**GDL:** Grau de Liberdade

**MQ:** Média Quadrática

**Fcalc:** Valor calculado de F

**F0,05:** Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

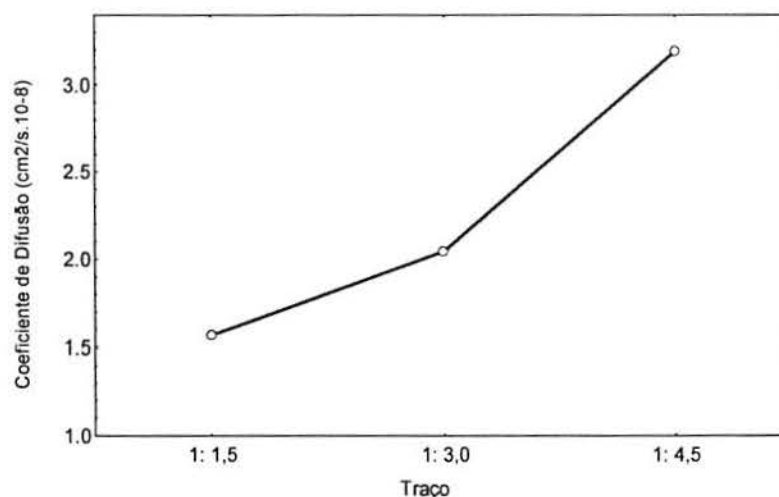
**S:** Significativo

**NS:** Não Significativo

**\*Significância:** Fcalc > F0,05 : S

Fcalc < F0,05 : NS

A variável que apresentou influência estatisticamente significativa no coeficiente de difusão foi o traço, como pode ser visualizado na figura 7.44.



**Figura 7.44** Efeito do traço no coeficiente de difusão

Estes resultados foram coerentes aos verificados na bibliografia (DHIR e BYARS, 1993; PEREIRA, 2001, entre outros), onde tem-se o coeficiente de difusão diretamente proporcional à relação água/aglomerante. Segundo NGALA et al. (1995), a relação água/aglomerante tem sido considerada um dos principais fatores a reger a difusão dos íons, tendo sua atuação como decorrência da influência na variação da estrutura dos poros.

Da mesma forma que para a resistência à compressão e absorção por sucção capilar, o teor de substituição adotado não apresentou influência significativa, podendo-se trabalhar com até 50% de incorporação da ACIGRAN. Este comportamento pode estar ligado à mobilidade iônica, menor relação água/aglomerante e menor teor de hidróxido de cálcio. No primeiro caso, devido a ACIGRAN possuir alta reatividade desde às primeiras idades, que além de funcionar como pontos de nucleação, proporciona um número maior de pequenos cristais, originando uma estrutura de poros com uma menor facilidade de deslocamento dos íons. Além disso, a menor quantidade de produtos hidratados do cimento é compensada pela ação pozolânica e filer da ACIGRAN. No segundo lugar, pelo fato da

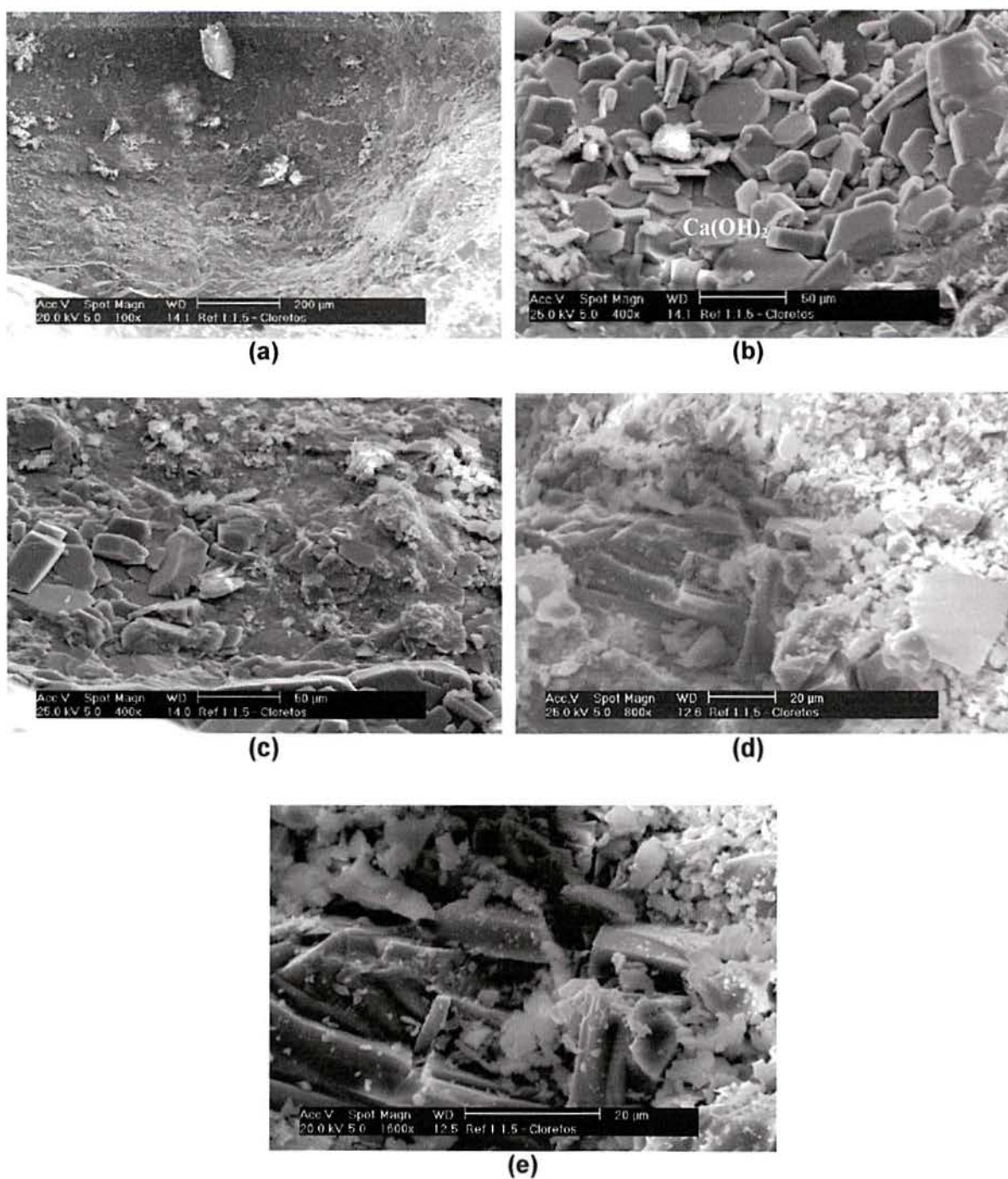
ACIGRAN, melhorar a trabalhabilidade, implicando em uma redução de água, para uma mesma consistência, para todos os traços moldados, conforme apresentado nas tabelas 7.2 a 7.4. No que diz respeito a influência positiva do baixo teor de hidróxido de cálcio, este poderia ser o responsável pela tendência das argamassas com 30 e 50% de ACIGRAN, principalmente as com alto consumo de cimento das argamassas, de apresentarem menor coeficientes de difusão, apesar de não se verificar diferença significativa entre os resultados obtidos.

Normalmente o uso de adições tais como sílica ativa, escória de alto-forno e cinza volante, em diferentes teores, aumentam a resistência à penetração de íons cloretos, normalmente pela diminuição das dimensões dos poros e densificação da zona de transição (HISADA et al., 1999). Para PHILIPOSE et al. (1991), o fato da escória de alto-forno favorecer a resistência à entrada de íons, deve-se não somente a menor dimensão de poros, mas também a um menor teor de hidróxido de cálcio quando comparado com o de referência. Segundo HORNAIN et al. (1995), o uso de fíler propicia a formação de uma estrutura de poros descontínua, favorecendo a diminuição do coeficiente de difusão.

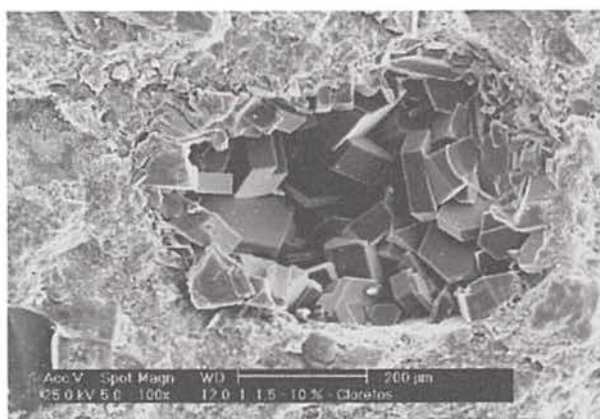
SATO et al. (1986) complementa que o uso partículas muito finas (Blaine > 8000cm<sup>2</sup>/g), no caso por ele estudado de escórias de alto-forno, é eficaz para evitar a penetração de íons cloretos.

As figuras 7.45 e 7.46 mostram a microestrutura da argamassa de referência 1: 1,5 e da com 10% de ACIGRAN, após o ataque por solução de cloretos. Observou-se, em ambas, uma grande concentração de hidróxido de cálcio. Estas duas argamassas foram as que apresentaram maior coeficiente de difusão. A partícula esférica, posicionada ao lado do hidróxido de cálcio na figura 7.46 f, é um grão de ACIGRAN, conforme análise química através de EDS, indicada na figura 7.47.

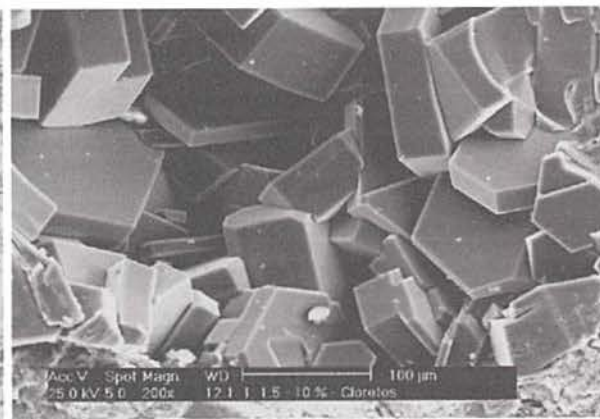




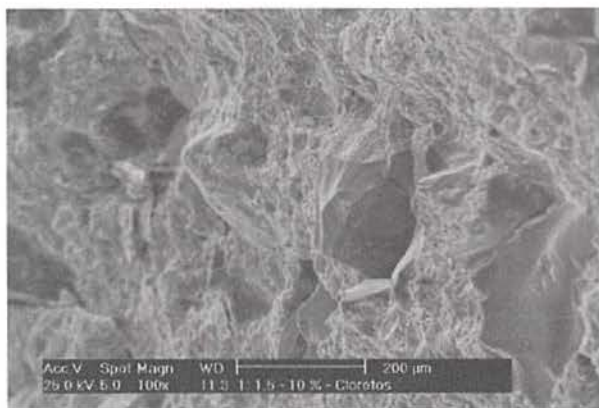
**Figura 7.45** Micrografia da argamassa 1: 1,5 sem ACIGRAN, elétrons secundários (a) magnitude 100 x (b) 400 x (c) 400 x (d) 800 x (e) 1600 x



(a)



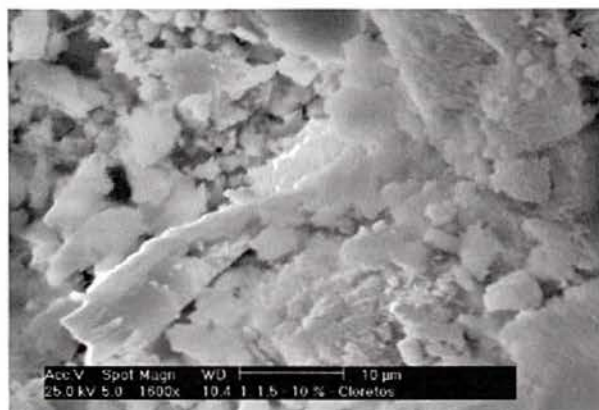
(b)



(c)



(d)



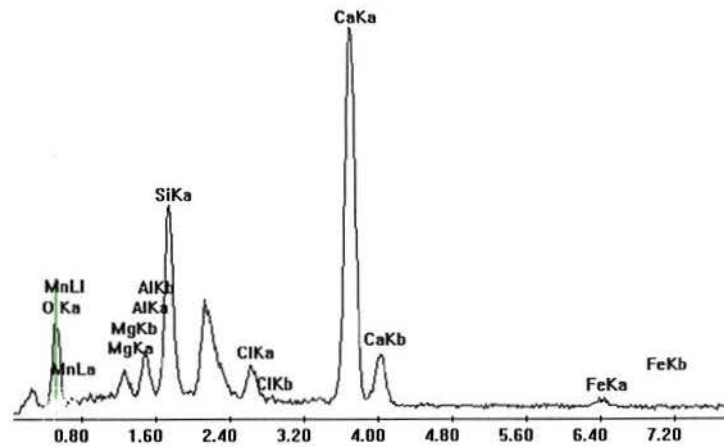
(e)



(f)

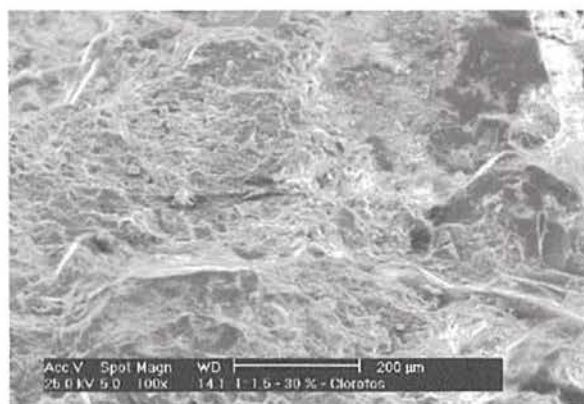
**Figura 7.46** Micrografia da argamassa 1: 1,5 com 10% de ACIGRAN, elétrons secundários (a) magnitude 100 x (b) 200 x, detalhe da figura 7.46 (a) (c) 100 x (d) 400 x (e) 1600 x (f) 1600 x



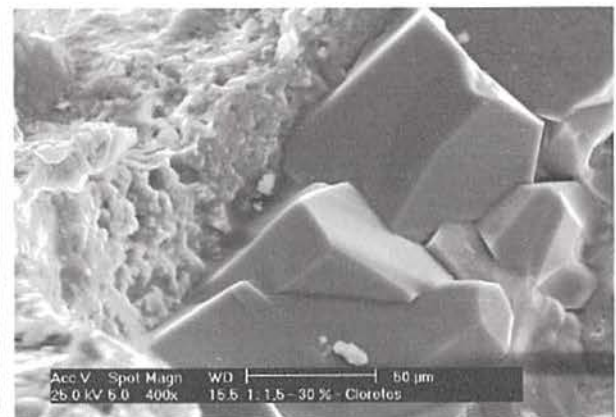


**Figura 7.47** EDS da partícula esférica não hidratada de escória da figura 7.48 (f)

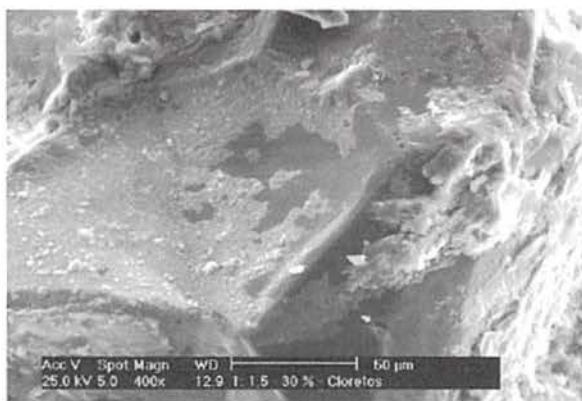
Com 30 % de substituição observa-se uma estrutura bem densa, mas ainda com espaço, nos vazios existentes, para formação de hidróxido do cálcio, como pode ser visto na figura 7.48.



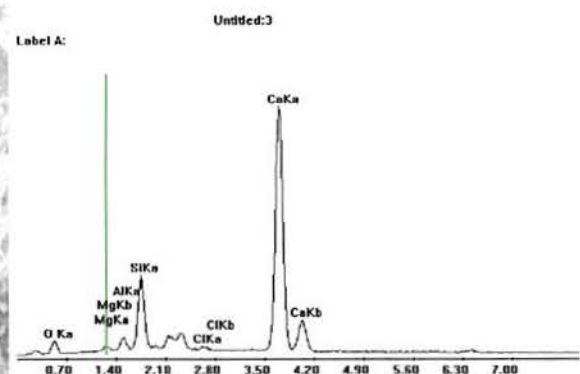
**(a)**



**(b)**



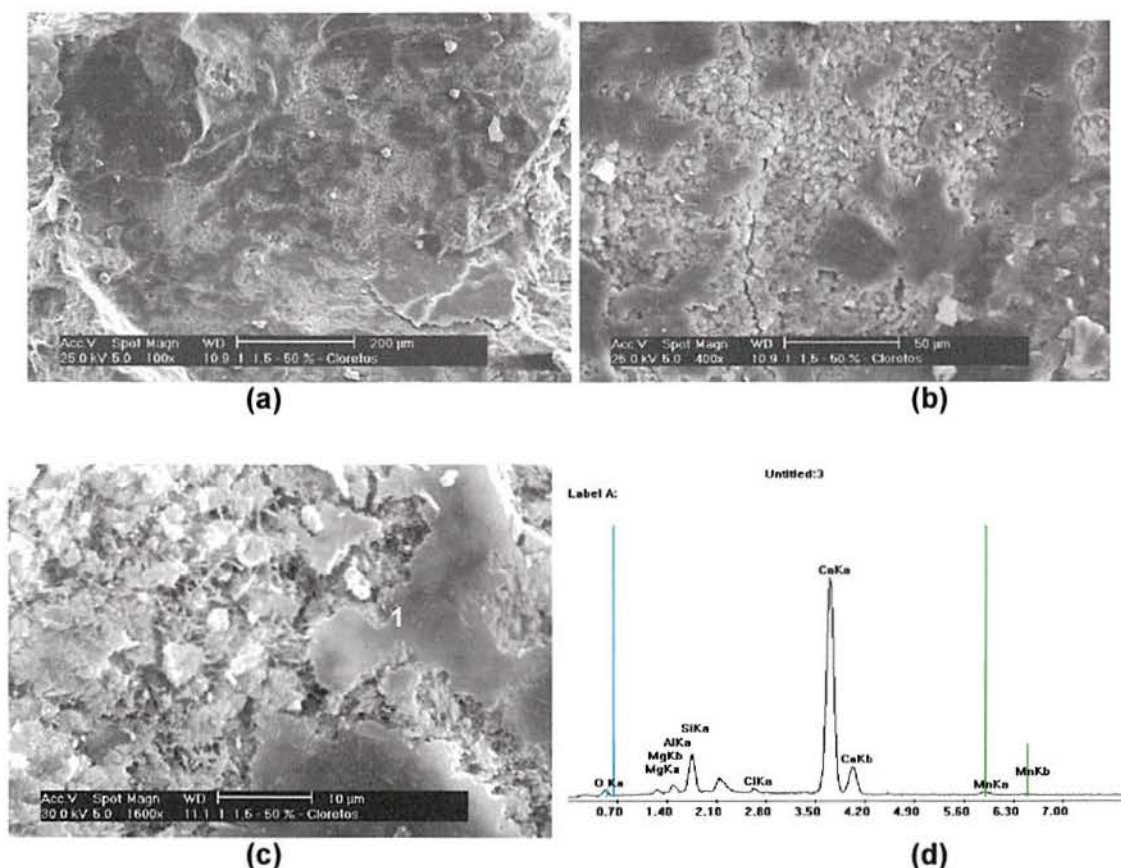
**(c)**



**(d)**

**Figura 7.48** Micrografia da argamassa 1: 1,5 com 30% de ACIGRAN, elétrons secundários **(a)** magnitude 100 x **(b)** 400 x **(c)** 400 x **(d)** eds do depósito de coloração branca sobre o agregado (superfície lisa mais escura)

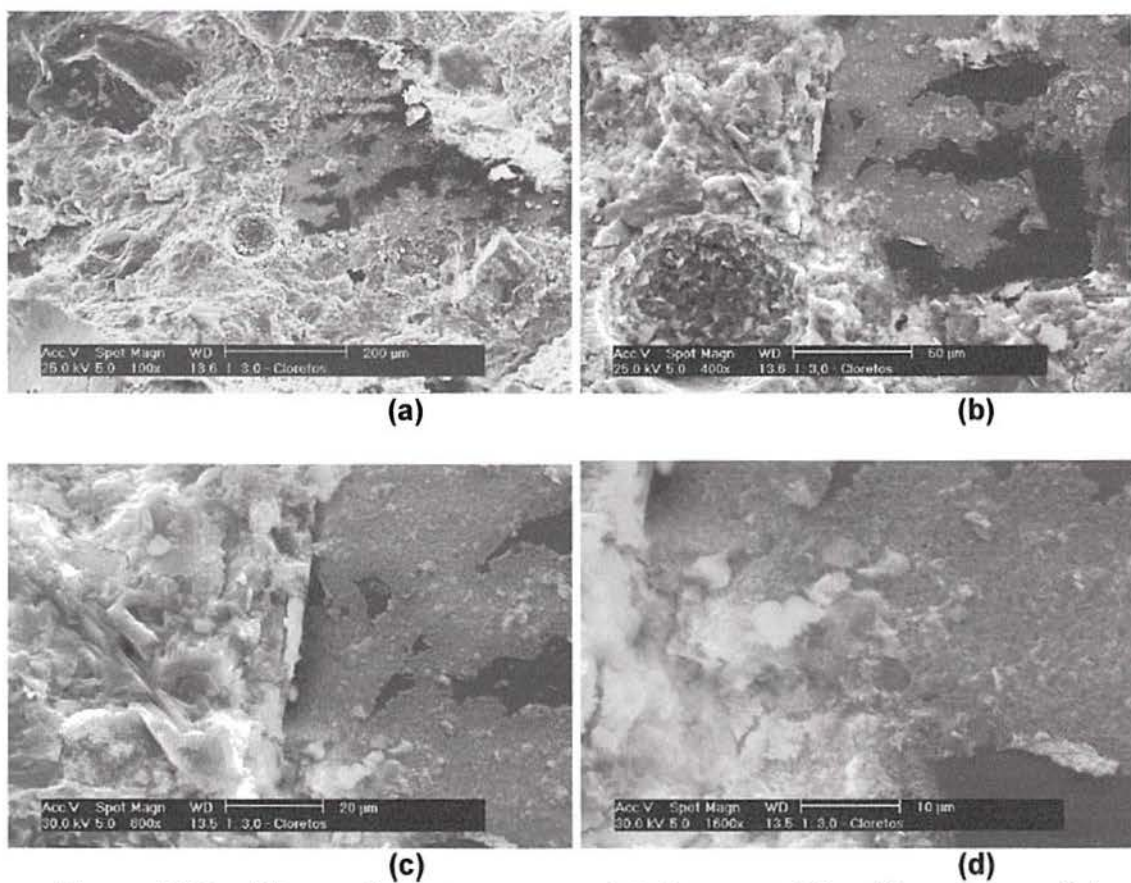
Observa-se no traço 1: 1,5 um número excessivo de hidróxido de cálcio, decrescendo com aumento do teor ACIGRAN, o que vem a confirmar, conforme ilustrado na figura 7.19, que o teor de ACIGRAN é inversamente proporcional ao de hidróxido de cálcio. Como consequência, verifica-se que a estrutura das argamassas com 50% de ACIGRAN é bem mais densa do que as demais, conforme pode ser vista na figura 7.49. A figura 7.49 (d) apresenta os elementos, determinados a partir de EDS, dos compostos formados na argamassa 1: 1,5 com 50 % de ACIGRAN.



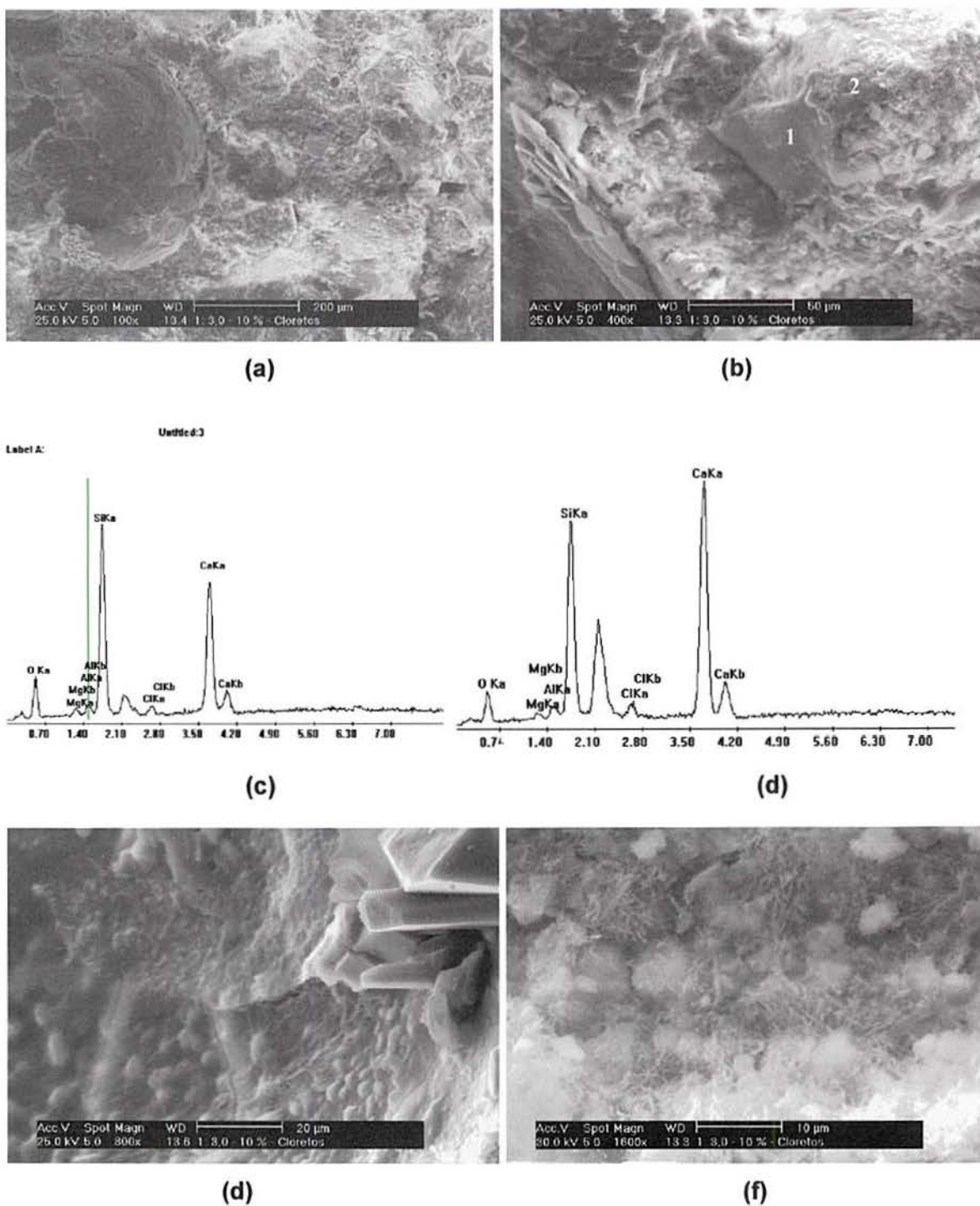
**Figura 7.49** Micrografia da argamassa 1: 1,5 com 50% de ACIGRAN, elétrons secundários (a) magnitude 100 x (b) 400 x (c) 1600 x (d) eds do ponto 1 da fig. 7.49 (c)

Nos traços 1:3,0 (figuras 7.50 a 7.53) e 1:4,5 (figuras 7.54 a 7.57), observa-se uma menor porcentagem de hidróxido de cálcio em relação a do traço 1:1,5, comprovando microestruturalmente os resultados obtidos por titulometria e indicados na figura 7.19. O menor teor de hidróxido de cálcio presente é decorrente do menor consumo de cimento e ACIGRAN para estes traços. A figura 7.51 (c) e (d) apresentam os elementos, determinados a partir de EDS, dos compostos formados na argamassa 1: 3,0 com 10 % de ACIGRAN, indicados na figura 7.51 (b).



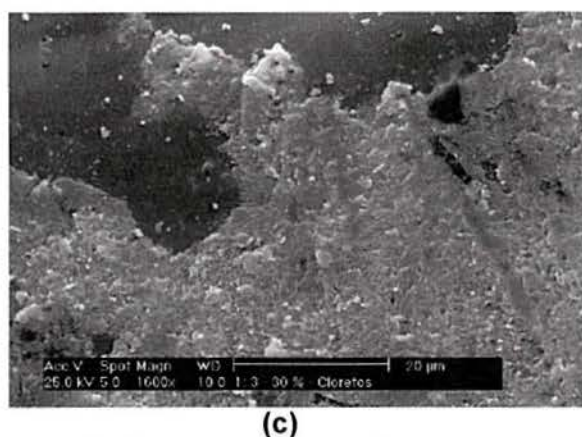
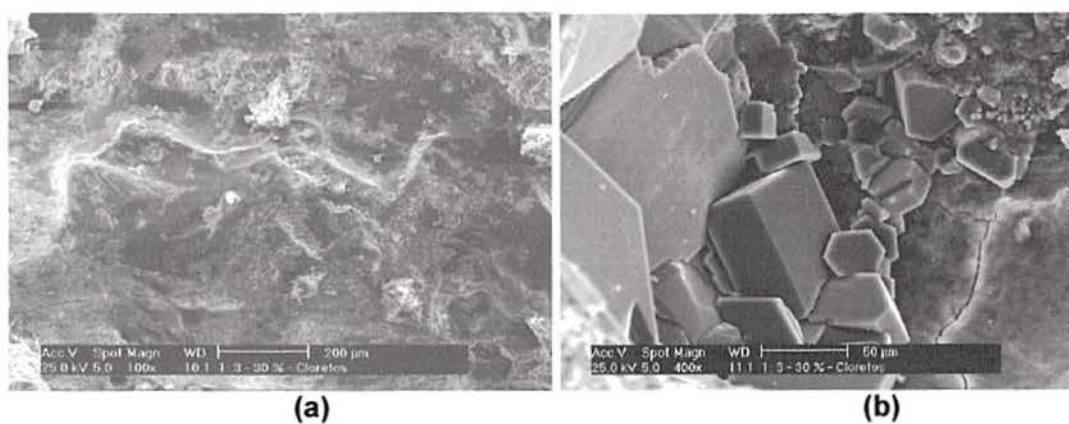


**Figura 7.50** Micrografia da argamassa 1: 3,0 sem escória, elétrons secundários (a) magnitude 100 x (b) 400 x (c) 800 x (d) 1600 x

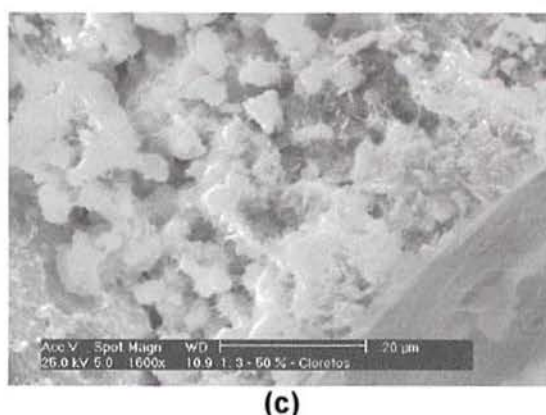
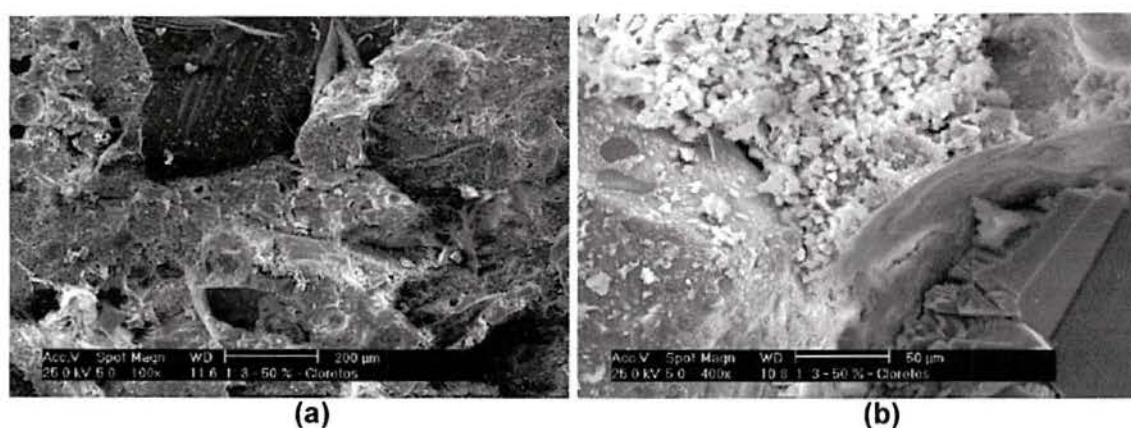


**Figura 7.51** Micrografia da argamassa 1: 3,0 com 10% de ACIGRAN, elétrons secundários (a) magnitude 100 x (b) 400 x (c) EDS do ponto 1 fig. 7.51 (b) (d) EDS do ponto 2 fig. 7.51(b) (e) 800 x (f) 1600 x

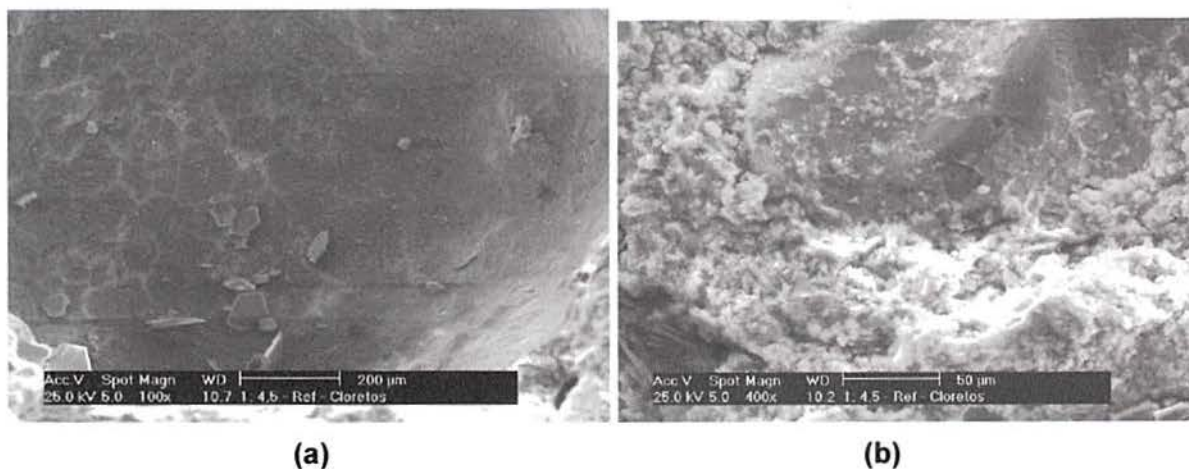




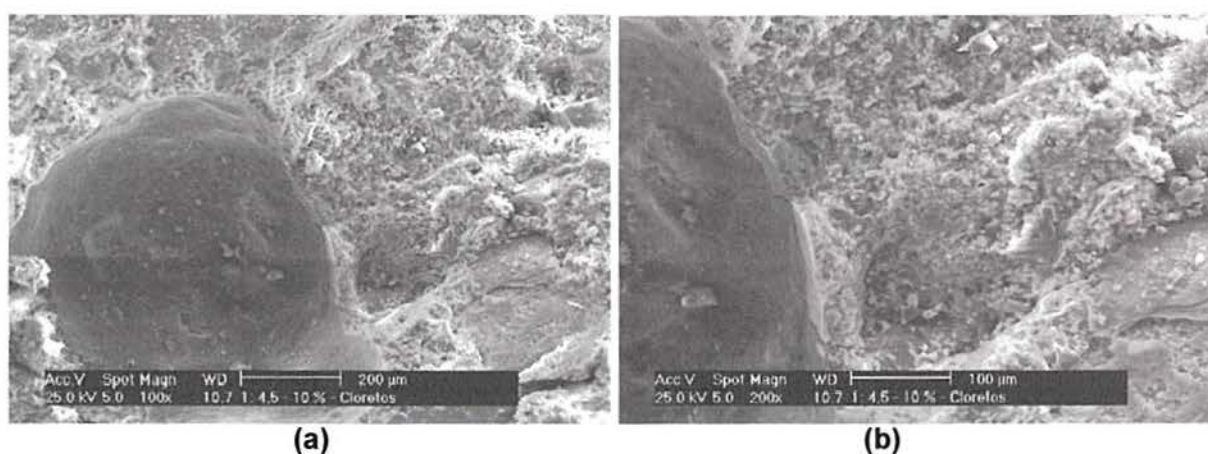
**Figura 7.52** Micrografia da argamassa 1: 3,0 com 30% de ACIGRAN, elétrons secundários (a) magnitude 100 x (b) 400 x (c) 1600 x



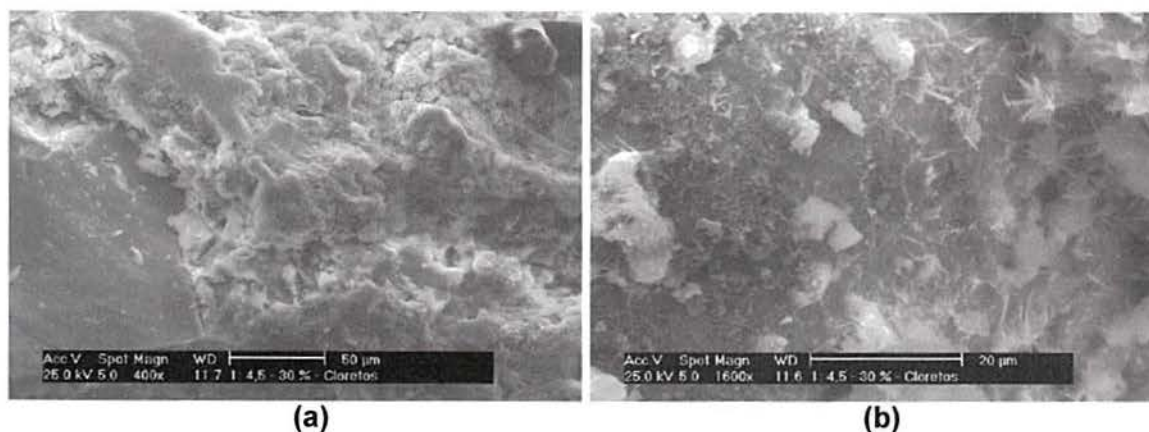
**Figura 7.53** Micrografia da argamassa 1: 3,0 com 50% de ACIGRAN, elétrons secundários (a) magnitude 100 x (b) 400 x (c) 1600 x



**Figura 7.54** Micrografia da argamassa 1: 4,5 sem ACIGRAN (a) magnitude 100 x (b) 400x

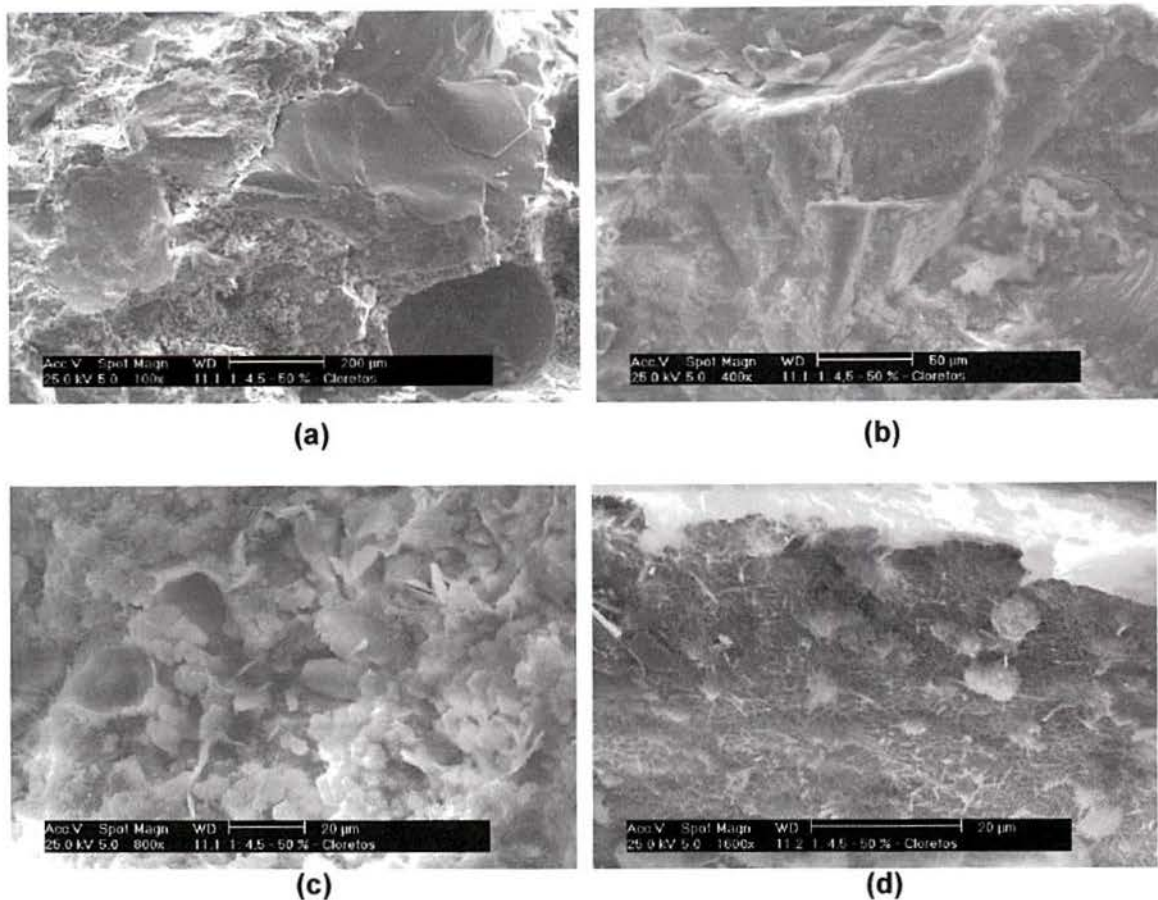


**Figura 7.55** Micrografia da argamassa 1: 4,5 com 10% de ACIGRAN (a) magnitude 100 x (b) 200 x



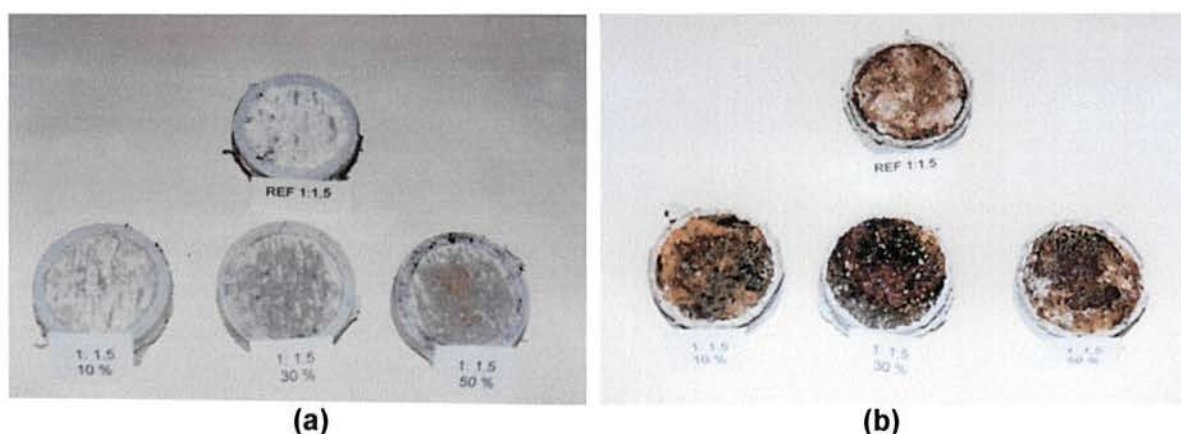
**Figura 7.56** Micrografia da argamassa 1: 4,5 com 30 % de ACIGRAN (a) magnitude 400 x (b) 160 x



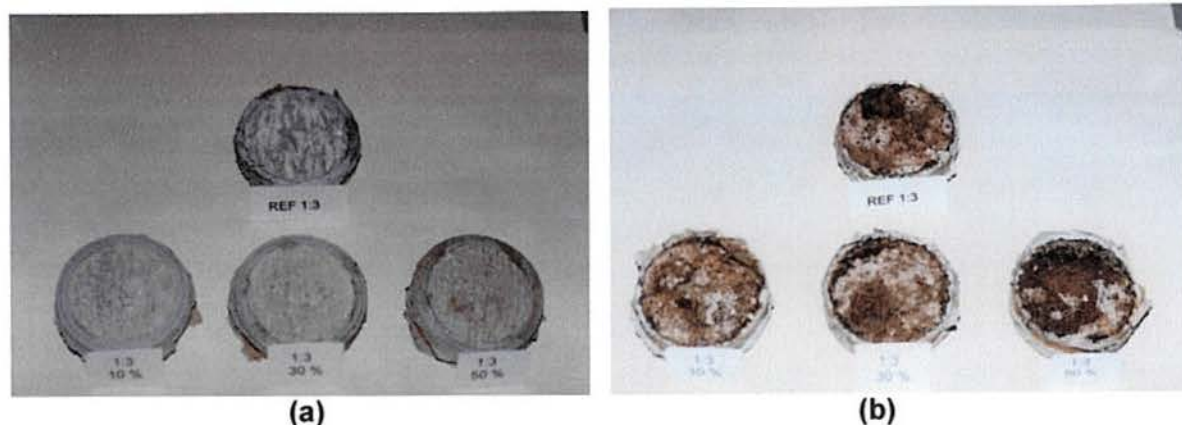


**Figura 7.57** Micrografia da argamassa 1: 4,5 com 50% de ACIGRAN, elétrons secundários (a) magnitude 100 x (b) 400 x (c) 800 x (d) 1600 x

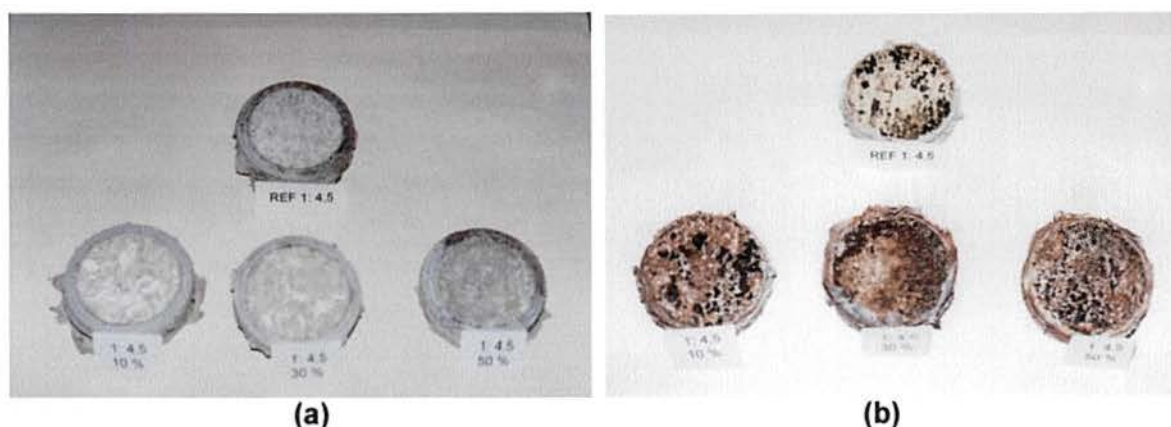
As figuras 7.58 e 7.60 mostram o aspecto das faces dos corpos-de-prova, em contato, simultaneamente, com a solução de 0,5 M cloreto da câmara negativa e com a solução da câmara positiva que inicialmente era água deionizada.



**Figura 7.58** (a) depósito de cloreto de sódio sobre as superfícies dos corpos-de-prova 1: 1,5, em contato com a câmara negativa, após o término do ensaio; (b) depósito de óxido de ferro, decorrente provavelmente da oxidação do eletrodo, sobre a superfície dos corpos-de-prova 1: 1,5, em contato com a solução da câmara positiva, no final do ensaio.



**Figura 7.59** (a) depósito de cloreto de sódio sobre as superfícies dos corpos-de-prova 1: 3,0 em contato com a câmara negativa, após o término do ensaio; (b) depósito de óxido de ferro, decorrente provavelmente da oxidação do eletrodo, sobre a superfície dos corpos-de-prova 1: 3,0 em contato com a solução da câmara positiva, no final do ensaio.



**Figura 7.60** (a) depósito de cloreto de sódio sobre as superfícies dos corpos-de-prova 1: 4,5, em contato com a câmara negativa, após o término do ensaio; (b) depósito de óxido de ferro, decorrente provavelmente da oxidação do eletrodo, sobre a superfície dos corpos-de-prova 1: 4,5, em contato com a solução da câmara positiva, no final do ensaio.

O aspecto ferruginoso da face em contato com a câmara positiva é ocasionado pela oxidação do eletrodo, apesar de ter sido utilizado aço inoxidável. Entretanto, foi empregado o aço ABNT 304 ao invés do ABNT 316 que possui maior resistência a íons cloretos (FRANZI, 1995).

Quanto ao depósito superficial de coloração branca não foi possível examiná-lo, em virtude da pequena quantidade de material. Os traços que apresentavam maior depósito foram o traço 1: 4,5 e 1:3,0, apesar que neste último, a figura 7.59 não é muito representativa, uma vez que os depósitos se descolavam com facilidade.

Pela aparência superficial, estimou-se que este depósito superficial era carbonato de cálcio e de hidróxido de cálcio. O que posteriormente foi confirmado por PEREIRA (2001), a qual realizou o mesmo ensaio, em condições bem similares, porém com concretos sem adição, mas com diferentes tipos de cimento. O resultado da análise por difração de raios-x,



confirmou a hipótese, encontrando-se basicamente portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Este último é decorrente da armazenagem ao longo do tempo, sem as precauções para evitar a carbonatação da amostra.

#### 7.5.4.4 Conclusões

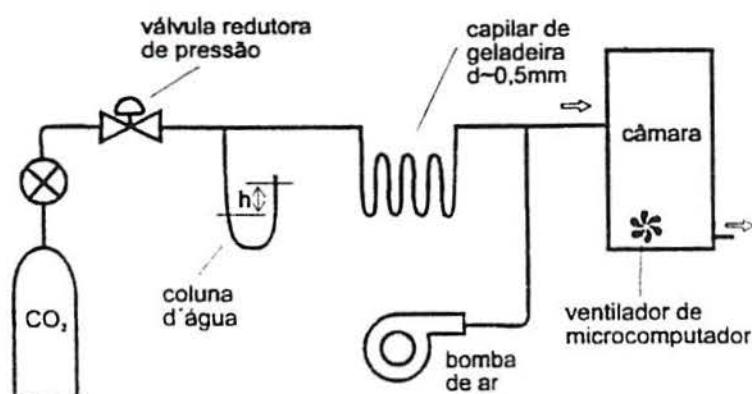
Apesar do teor de ACIGRAN não ter, estatisticamente, influência, observa-se uma diminuição no coeficiente de difusão das argamassas com ACIGRAN, principalmente à medida que aumenta-se o teor, nos traços de maior consumo de cimento.

A causa deste bom desempenho pode estar ligado a três fatores: menor mobilidade iônica decorrente de uma estrutura de poros mais densa, constituída de um maior número de cristais pequenos, pelo fato da escória atuar como pontos de nucleação; menor quantidade de água para uma mesma trabalhabilidade e por último, quanto maior o teor de ACIGRAN, menor o teor de hidróxido de cálcio.

#### 7.5.5 Ensaio de Carbonatação Acelerada

Este ensaio foi realizado em uma câmara de carbonatação acelerada com 5% de  $\text{CO}_2$ , montada na UFRGS, com base em uma desenvolvida por JOHN (1995). O teor adotado foi em função da câmara ser utilizada em diversas pesquisas com argamassas e concretos com diferentes relações água/aglomerante. Este teor pareceu o adequado para atender uma ampla faixa de relações água/aglomerante, permitindo um número maior de leituras para materiais com relações maiores e ao mesmo tempo não demandar um tempo demasiadamente longo para relações mais baixas.

A figura 7.63 mostra, esquematicamente, o funcionamento da câmara de carbonatação.



**Figura 7.61** Representação esquemática da câmara de carbonatação (JOHN, 1995)

Para este ensaio foram moldados corpos-de-prova prismáticos de dimensão (40 x 40 x 160) mm. A escolha do formato e das dimensões foi em função de permitir a avaliação em um maior número de idades e pela dimensão da câmara.

Os traços analisados, assim como os teores de ACIGRAN, foram os mesmos já avaliados nas outras propriedades analisadas, sendo ensaiados três exemplares para cada combinação de variáveis.

As idades avaliadas foram 14, 28, 56, 91 e 120 dias. A menor idade foi adotada em virtude de trabalhar com um traço bastante pobre, com relação água/aglomerante alta, com alta probabilidade de carbonatação a baixas idades. Inversamente, a idade de 120 dias foi em função do traço 1:1,5. O número de idades foi limitado pela dimensão do corpo-de-prova.

Os procedimentos de preparo das amostras para realização do ensaio foram os mesmos utilizados por MOURA (2000), que consistiu em envolver os corpos-de-prova em filme plástico, para evitar uma possível carbonatação, antes de colocá-los em câmara úmida, aonde permaneceram durante sete dias. Após este período, foi removido o filme plástico, pesados todos os exemplares e colocados em câmara de sazonalamento (figura 7.62) para atingir umidade de equilíbrio da câmara climatizada (umidade  $68 \pm 2\%$  e temperatura  $21 \pm 2^\circ\text{C}$ ), determinada através de pesagens periódicas.

Ao atingir o equilíbrio com a câmara climatizada, os corpos-de-prova foram posicionados em duas bandejas da câmara de carbonatação acelerada.

A figura 7.63 mostra os corpos-de-prova distribuídos na câmara de carbonatação, antes do início do ensaio.



**Figura 7.62** Corpos-de-prova posicionados na câmara de sazonalamento





**Figura 7.63** Posicionamento dos corpos-de-prova no interior da câmara de carbonatação acelerada

Uma das faces do corpo-de-prova foi demarcada indicando qual a posição do mesmo dentro da câmara e, a cada medição, era dada uma rotação de  $180^\circ$ , de forma a tentar minimizar uma possível má distribuição do gás carbônico dentro da câmara.

Na data de ensaio, os corpos-de-prova eram rompidos em uma prensa manual de forma a retirar uma fatia do corpo-de-prova. Na parte interna desta fatia era aspergida solução de fenoftaleína 1%. A leitura da espessura da área carbonatada, que não apresentava coloração rosa carmin, foi feita nos quatro lados, sempre perpendicular a estes, com um paquímetro digital.

A determinação da profundidade de carbonatação pela observação visual da área carbonatada pela aspersão de indicadores químicos sobre uma superfície recém fraturada é a técnica usualmente empregada, pela sua praticidade e baixo custo (KAZMIERCZAK, 1995). Este processo serve como indicativo e apresenta resultados coerentes com outras técnicas, como por exemplo determinação do pH por titulometria (STEIDLER, 1999). Entretanto, é um método impreciso (LITVAN e MEYER, 1986).

Uma vez concluída a medição, os exemplares tinham a superfície de ruptura coberta com parafina e retornavam à câmara até a próxima medição.

#### **7.5.5.1 Apresentação dos resultados**

A tabela 7.30 apresenta a espessura de carbonatação das argamassas ao longo do tempo.

Nas figuras 7.64 a 7.72, observa-se o aspectos dos corpos-de-prova de argamassa, nos distintos traços, após ruptura e aspersão de solução de fenoftaleína, nas diferentes idades.

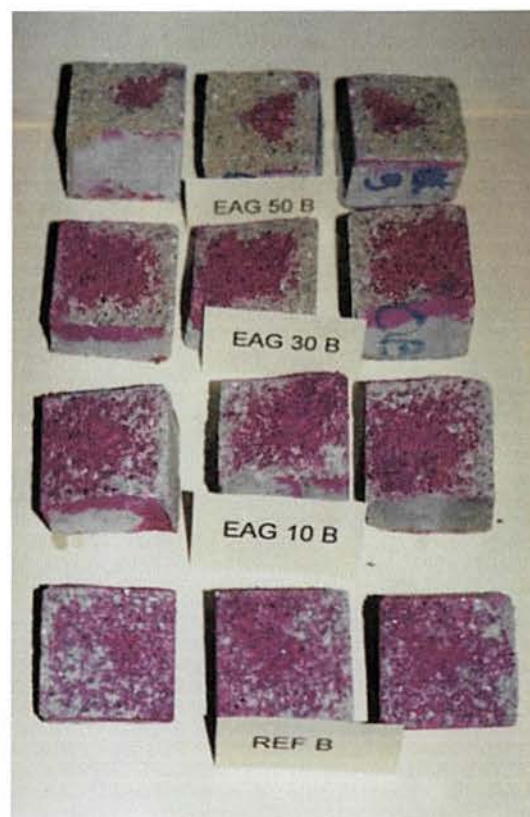
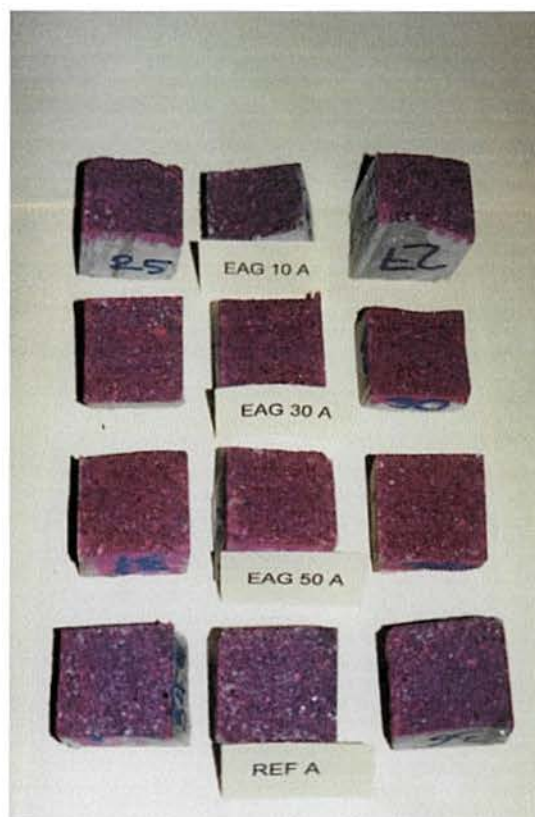


**Tabela 7.30** Espessura de carbonatação nas distintas idades e traços

		14 dias		28 dias		56 dias		91 dias		120 dias	
		Esp (mm)	Esp Média (mm)	Esp (mm)	Esp Média (mm)	Esp (mm)	Esp Média (mm)	Esp (mm)	Esp Média (mm)	Esp (mm)	Esp Média (mm)
1:1,5		0		0		0		0		1,0	0,8
	0 %	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6	
		0		0		0		0		0,0	
		0		0		0		0		0	
	10 %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
	30 %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0		0		0		0		0	
		0		0		0		0		0	
	50 %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0		0		0		0		0	
1:1,3		0		0		10		0,6		0,8	
	0 %	0,3	0,3	0	0	1,4	4,0	1,6	0,9	1,1	1,0
		0		0		0,5		0,4		0,9	
		0,5		0,5	0,5	0,8		1,1	1,4	0,9	
	10 %	0	0,5	0		0,6	0,8	1,2		2,1	1,4
		0		0,0		1,0		1,8		1,2	
		1,0		1,5		3,6		4,8	4,5	5,9	
	30 %	1,8	1,4	1,3	1,2	3,6	3,9	4,2		4,4	5,4
		0		0,7		4,3		4,6		5,8	
		2,2		5,4		2,6		8,3	10,1	20	
	50 %	2,9	2,6	5,5	6,2	9,7	8,0	10,6		11,7	14,7
		2,7		7,8		11,8		11,5		12,4	
1:4,5		13,8		20		20		20		20	
	0 %	12,1	15,4	20	20	20	20	20	20	20	20
		20,0		20		20		20		20	
		13,9		20		20		20		20	
	10 %	14	13,9	20	20	20	20	20	20	20	20
		13,7		20		20		20		20	
		12,6		20		20		20		20	
	30 %	12,5	12,1	20	20	20	20	20	20	20	20
		11,1		20		20		20		20	
		12,0		20		20		20		20	
	50 %	12,1	12,3	20	20	20	20	20	20	20	20
		12,7		20		20		20		20	

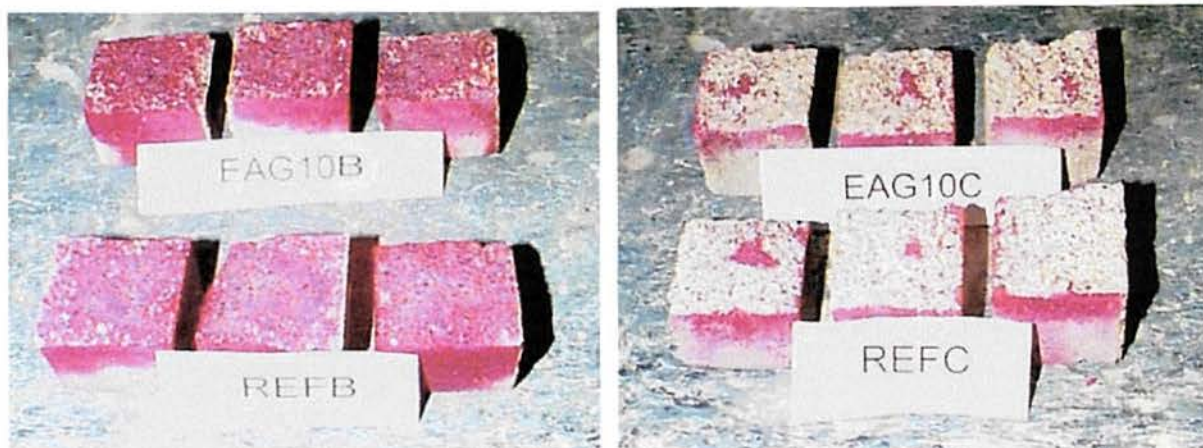


**Figura 7.64** Aspecto dos corpos-de-prova após aspersão de fenofaleína, do traço 1: 4,5 e 1: 3,0, da esquerda para direita, na idade de 14 dias

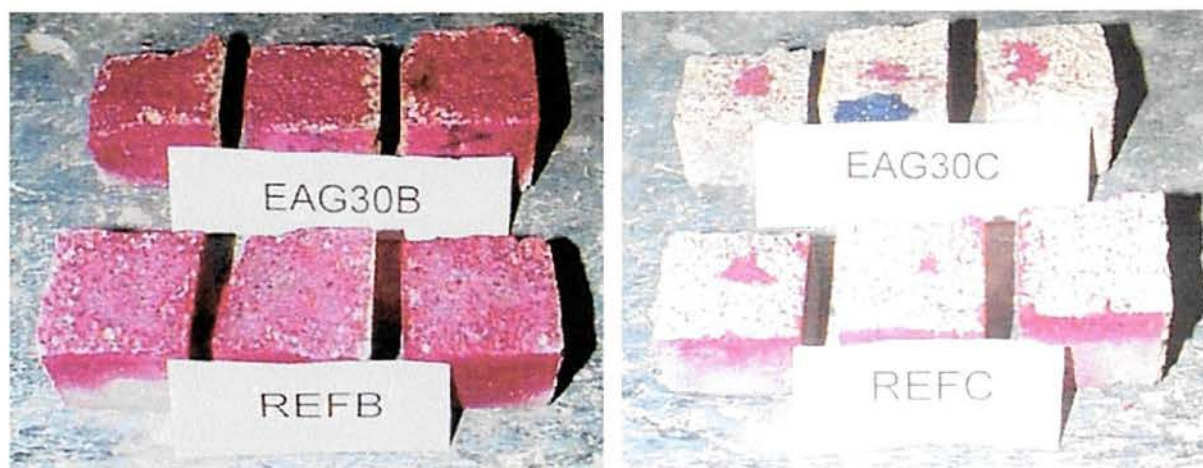


**Figura 7.65** Aspecto dos corpos-de-prova de argamassa após aspersão de fenofaleína, na idade de 56 dias, (a) traço 1: 1,5 e (b) traço 1: 3,0.

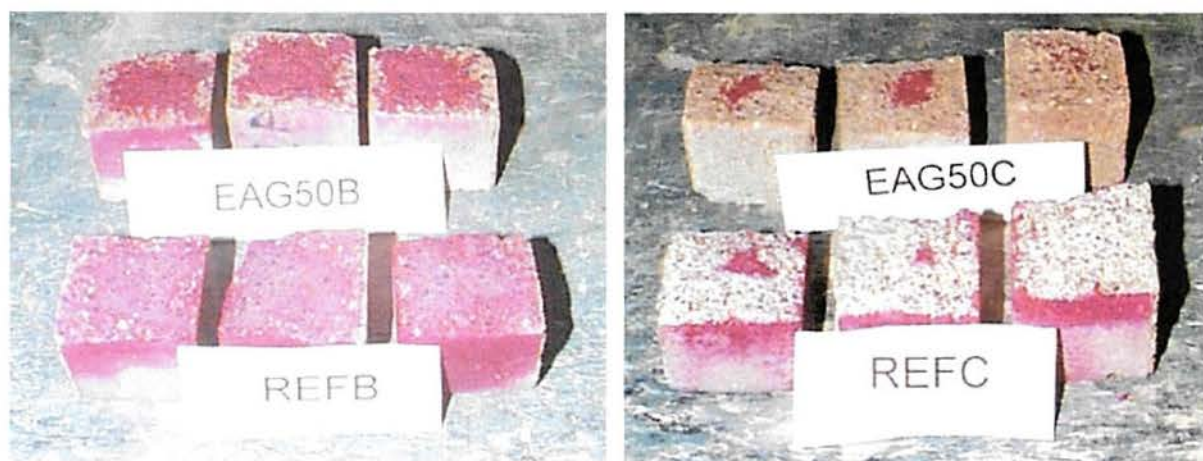




**Figura 7.66** Aspecto do corpo-de-prova após aspersão de indicador de fenofaleína, aos 14 dias, em argamassas com 10% de AciGran (a) traço 1: 3,0 e (b) traço 1: 4,5

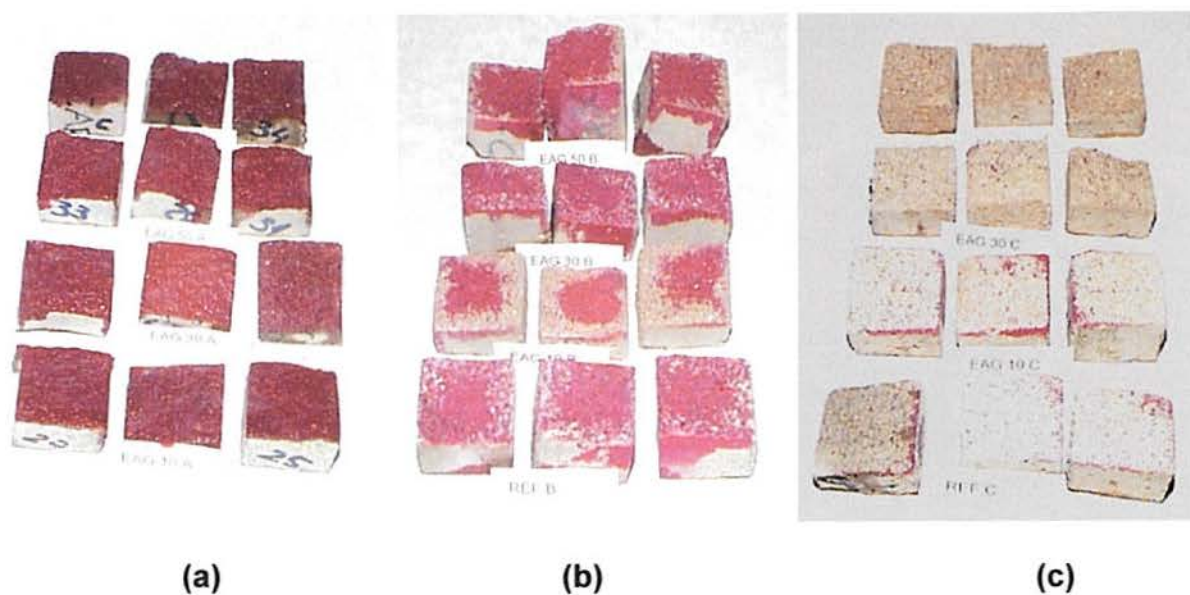


**Figura 7.67** Aspecto do corpo-de-prova após aspersão de indicador de fenofaleína, aos 14 dias, em argamassas com 30% de AciGran (a) traço 1: 3,0 e (b) traço 1: 4,5

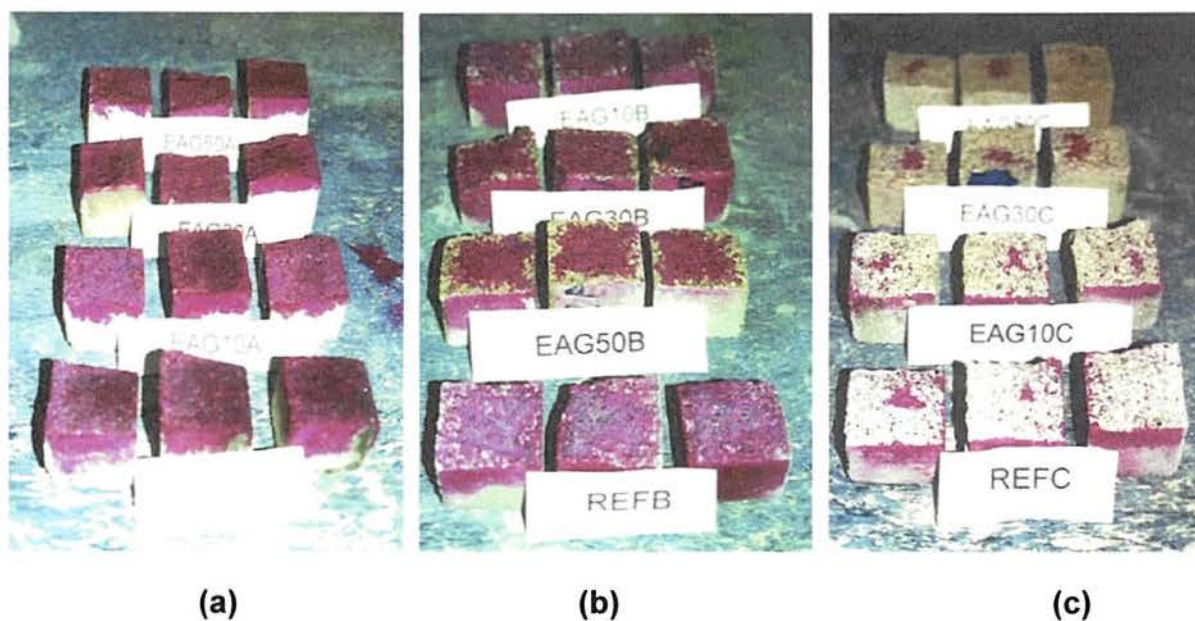


**Figura 7.68** Aspecto do corpo-de-prova após aspersão de indicador de fenofaleína, aos 14 dias, em argamassas com 50% de AciGran (a) traço 1: 3,0 e (b) traço 1: 4,5



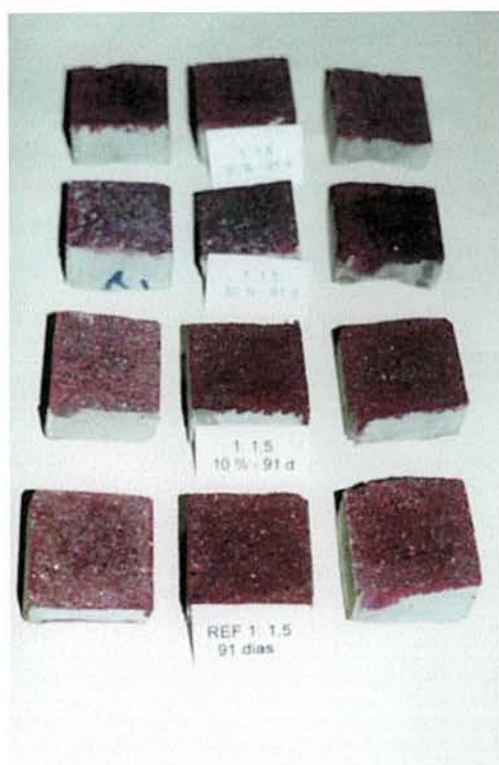


**Figura 7.69** Aspecto das argamassas com 0%, 10%, 30%, 50% de ACIGRAN, de baixo para cima na fotografia, após 28 dias em câmara acelerada de carbonatação, após aspersão de indicador de fenofaleína (a) traço 1: 1,5 (b) traço 1: 3,0 (c) traço 1: 4,5

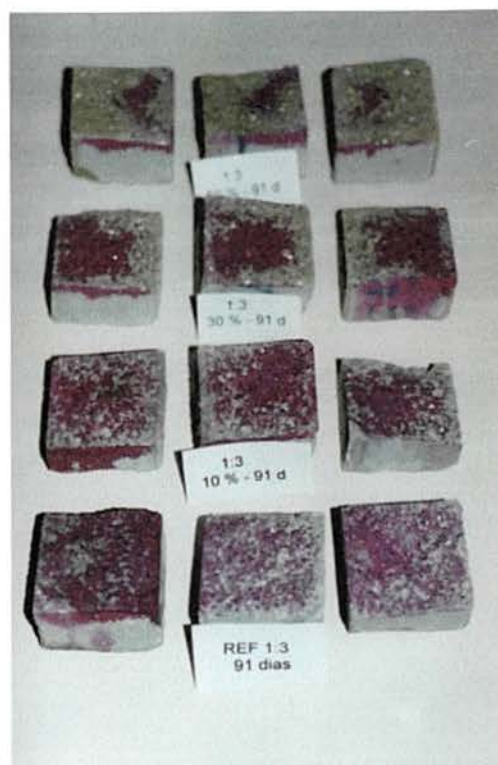


**Figura 7.70** Aspecto das argamassas com 0%, 10%, 30%, 50% de ACIGRAN, de baixo para cima na fotografia, após 56 dias em câmara acelerada de carbonatação, após aspersão de indicador de fenofaleína (a) traço 1: 1,5 (b) traço 1: 3,0 (c) traço 1: 4,5



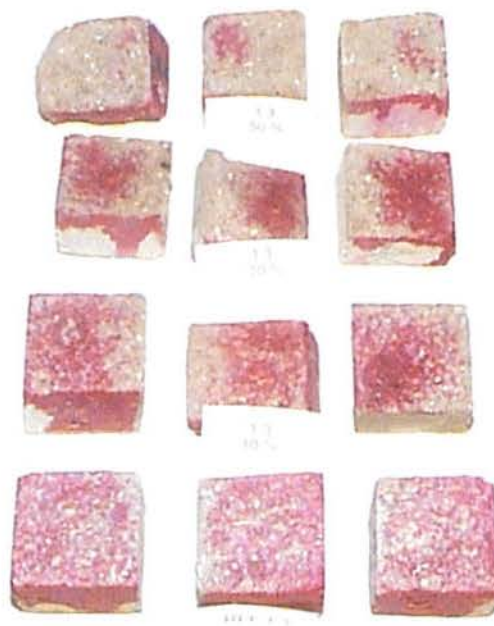


(a)



(b)

**Figura 7.71** Aspecto das argamassas com 0%, 10%, 30%, 50% de ACIGRAN, de baixo para cima na fotografia, após 91 dias em câmara acelerada de carbonatação, após aspersão de indicador de fenoftaleína (a) traço 1: 1,5 (b) traço 1: 3,0



**Figura 7.72** Aspecto das argamassas com 0%, 10%, 30%, 50% de ACIGRAN, de baixo para cima na fotografia, após 120 dias em câmara acelerada de carbonatação, após aspersão de indicador de fenoftaleína (a) traço 1: 1,5 (b) traço 1: 3,0

### 7.5.5.2 Análise e discussão dos resultados

Com vistas a determinar estatisticamente a influência das variáveis traço, teor e idade na frente de carbonatação das argamassas foi realizada a análise de variância. O resultado desta encontra-se na tabela 7.31.

**Tabela 7.31** Resultados da análise estatística (ANOVA) da profundidade de carbonatação

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Traço	2	5808,532	2020,671	3,07	S
Teor	3	46,574	16,202	2,68	S
Idade	4	69,181	24,067	2,45	S
Traço x Teor	6	47,166	16,408	2,17	S
Traço x Idade	8	30,241	10,520	2,02	S
Teor x Idade	12	6,317	2,198	1,83	S
Traço x Teor x Idade	24	3,475	1,209	1,61	NS
Erro	120	2,874			

**Gdl:** Grau de Liberdade

**MQ:** Média Quadrática

**F<sub>calc</sub>:** Valor calculado de F

**F<sub>0,05</sub>:** Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

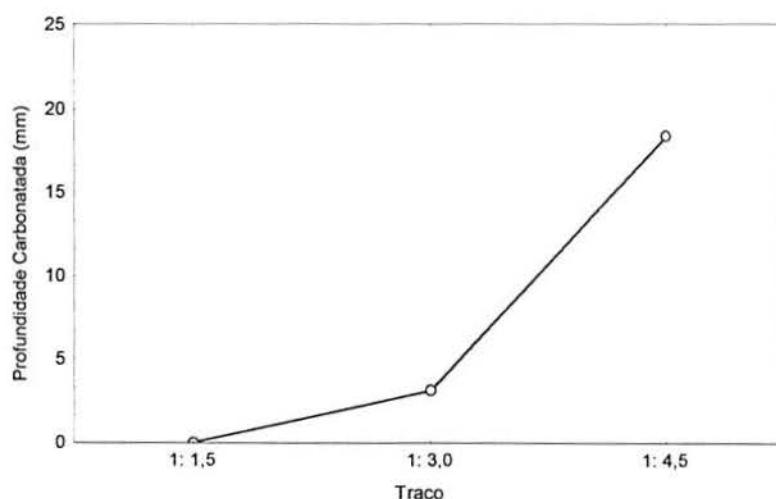
**S:** Significativo

**NS:** Não Significativo

**\*Significância:** F<sub>calc</sub> > F<sub>0,05</sub> : S

F<sub>calc</sub> < F<sub>0,05</sub> : NS

Da mesma forma que as outras propriedades analisadas, o traço influencia significativamente a profundidade de carbonatação, como pode ser visto na figura 7.73.

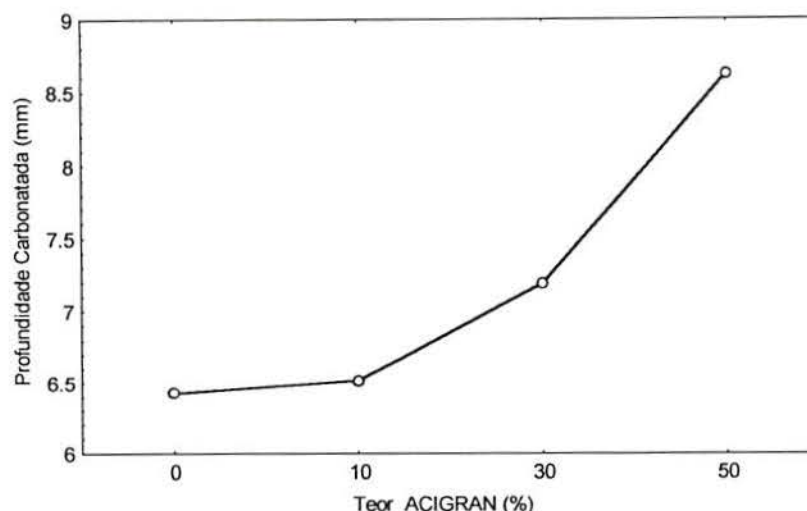


**Figura 7.73** Efeito do traço na profundidade de carbonatação

Como era esperado quanto menor o consumo de cimento, maior relação água/aglomerante, maior a facilidade de penetração do dióxido de carbono e conseqüentemente, maior carbonatação.

A figura 7.74 mostra o efeito do teor de substituição na profundidade de carbonatação, verificando-se que o avanço da frente de carbonatação é diretamente proporcional ao aumento do teor de ACIGRAN nas argamassas.





**Figura 7.74** Influência do teor de substituição na profundidade de carbonatação

Este é o comportamento usualmente encontrado ao empregar-se adições minerais, resultante da redução da reserva alcalina, decorrente da reação da sílica com o hidróxido de cálcio (NEVILLE, 1997), apesar da carbonatação não depender unicamente da quantidade total de hidróxido de cálcio livre existente na pasta de cimento, mas também dos demais compostos alcalinos da pasta ( Smolczyk<sup>7</sup> apud KAZMIERCZAK, 1995).

No caso de argamassas com ACIGRAN, a diminuição da reserva alcalina, como visto na figura 7.19, é decorrente da substituição do clínquer, com maior teor de óxido de cálcio, sódio e potássio, pela ACIGRAN com menor, e do consumo por parte da ACIGRAN de hidróxido de cálcio.

Um grande número de adições apresenta um baixo desempenho em relação a esta propriedade.

HÄKKINEN ( 1992) e LITVAN e MEYER (1986) acharam resultados que corroboram a afirmação feita por KAZMIERCZAK (1995), ao estudar concretos com escória de alto-forno. O primeiro encontrou um aumento de 50 % na profundidade de carbonatação de concretos com 70 % de substituição de cimento por escória de alto-forno quando comparados com concretos convencionais, submetidos durante 6 meses em câmara acelerada de carbonatação.

Uma maneira de minimizar este problema é através das condições de cura, que exercem papel fundamental no desenvolvimento da resistência à carbonatação. OSBORNE (1986) observou que concretos com elevados teores de escórias de alto-forno são mais susceptíveis à carbonatação quando não é feita uma cura adequada.

<sup>7</sup> SMOLCZYK, H. G. Discussion of Principal Paper on Carbonation of Concrete by Hamada. In: International SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5<sup>th</sup>, Tokio, 1968. **Proceedings**. Tokyo, 1969. P.369-84.

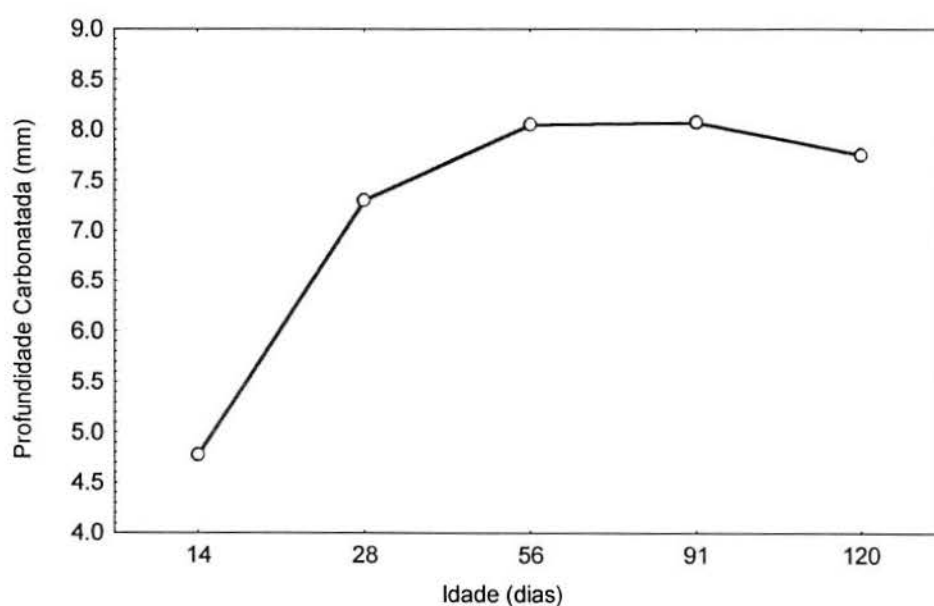
O uso de misturas ternárias ou binárias de cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa (TOKII et al., 1994), ou escória de aciaria LD e de alto-forno (LI et al., 1997) ou cinza volante e sílica ativa (JONES et al., 1997), cinza volante e escória de alto-forno (HORIGUCHI et al, 1994) não favoreceu a diminuição da frente de carbonatação.

Algumas poucas adições apresentam o comportamento contrário em relação à carbonatação.

ALVES (2000), investigando a influência da presença de cinza volante e cinza de casca de arroz, como substituição ao cimento, no desempenho quanto à carbonatação, verificou que esta é afetada negativamente pelos incrementos nas porcentagens de substituição. Os que apresentaram melhor comportamento quanto a este fenômeno foram os de cinza de casca de arroz, no teor de 12 %, que segundo o autor foi decorrente do efeito químico e físico de tamponamento dos poros capilares, não consumindo quantidade excessiva de hidróxido de cálcio. O teor máximo estudado foi de 25 % simultaneamente de cada adição.

A figura 7.75 ilustra a frente de carbonatação ao longo do tempo das argamassas. O avanço da frente de carbonatação nas primeiras idades, de 14 a 28 dias, se dá de forma muito rápida, podendo estar associado a uma parcela de ACIGRAN que ainda não tenha reagido, uma vez que as reações pozolânicas são mais lentas.

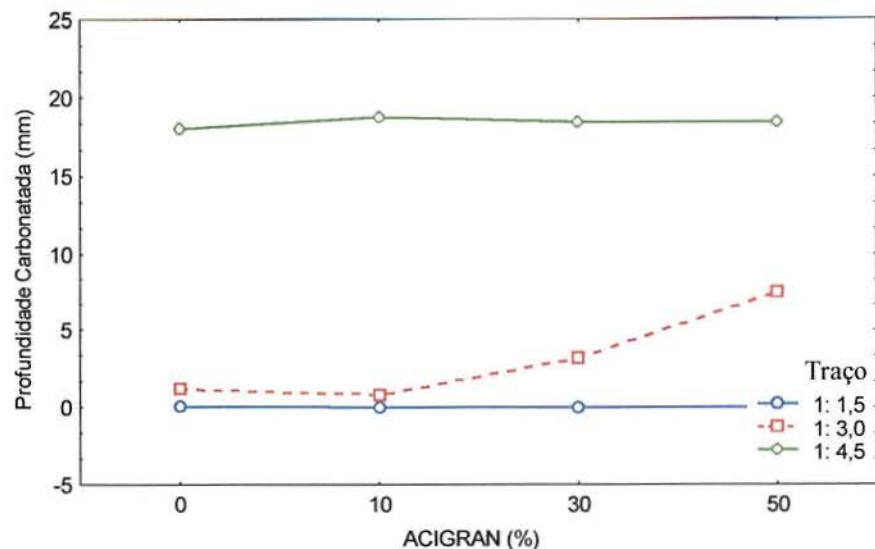
Pelo gráfico verifica-se, dos 91 para os 120 dias, uma redução na profundidade de carbonatação. Atribui-se este resultado à imprecisão no método de ensaio e à forma de medição, apesar que, analisando pelo método de Duncan, não existem diferenças significativas entre os valores para estas duas idades.



**Figura 7.75** Influência da idade na profundidade de carbonatação



A figura 7.76 mostra o efeito da interação do teor de substituição com o traço.

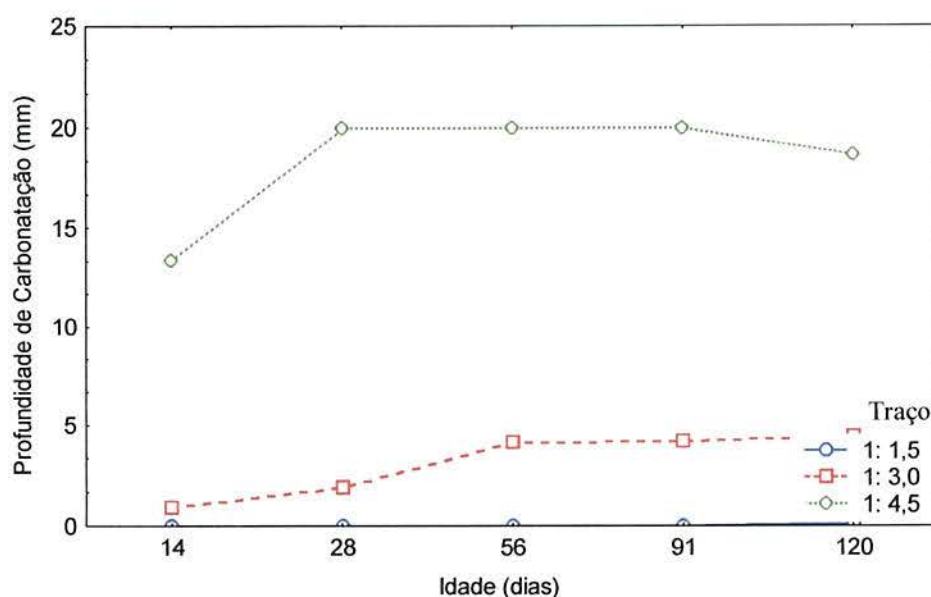


**Figura 7.76** Efeito da interação entre o teor de substituição eo traço na profundidade de carbonatação

Pode-se observar que para o traço mais pobre não houve alteração na profundidade de carbonatação com o acréscimo do teor de substituição. Da mesma forma, para o traço mais rico em cimento todos os teores analisados mantiveram o mesmo comportamento. A evolução da carbonatação em ambos os casos pode ser explicado pela porosidade, porém com efeitos contrários. O traço mais pobre apresenta uma porosidade tão elevada, que independente da baixa alcalinidade proporcionada com o aumento de ACIGRAN, há facilmente a penetração do  $\text{CO}_2$  e com isso a frente de carbonatação avança muito rapidamente. Com comportamento oposto, tem-se o traço de maior consumo de cimento, onde tem-se a porosidade tão baixa, que o  $\text{CO}_2$  não consegue penetrar, e a baixa alcalinidade não chega a interferir no processo.

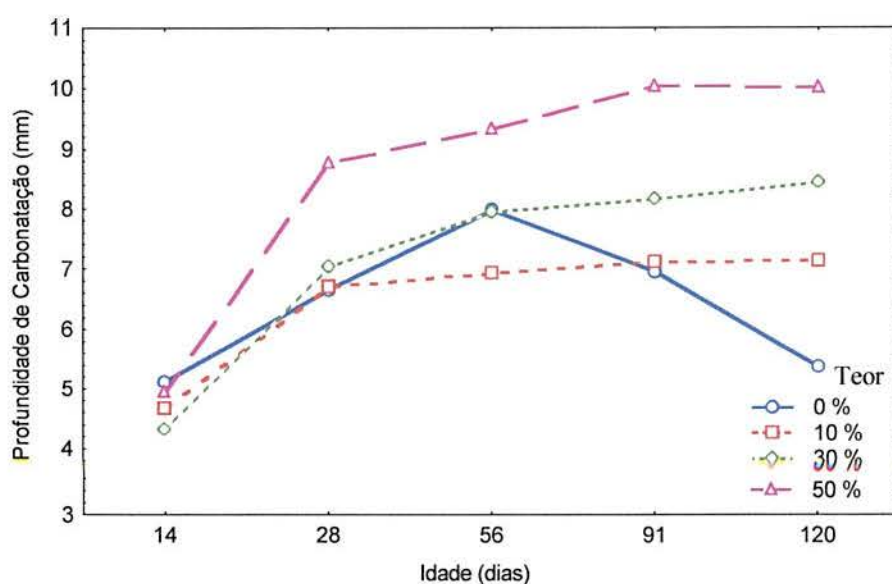
Para o traço 1: 3,0 observa-se uma influência negativa para substituições a partir de 10 %, provocando o aumento da frente de carbonatação. A porosidade situa-se em uma faixa intermediária, e a baixa alcalinidade começa a interferir negativamente.

A figura 7.77 apresenta a influência do idade e do traço na espessura de carbonatação. Para os traços 1:3,0 e 1:4,5, observa-se uma maior frente de carbonatação nas idades iniciais, tendendo a estabilizar a partir dos 56 dias. Esta diminuição da velocidade de carbonatação é esperada uma vez que o carbonato formado vai ocupando os poros, dificultando a penetração do  $\text{CO}_2$ . Através da análise de diferenças entre médias, pelo método Duncan, verificou-se que não existe diferenças significativas entre os valores de profundidade de carbonatação para o traço 1: 4,5, para todas idades.



**Figura 7.77** Efeito da interação entre a idade e o traço na profundidade de carbonatação

A figura 7.78 mostra o efeito da interação da idade com o teor de substituição sobre a profundidade carbonatada das argamassas.



**Figura 7.78** Efeito da interação entre a idade e o teor na profundidade de carbonatação

Verifica-se que, a medida que aumenta-se o teor de ACIGRAN, há um aumento da profundidade carbonatada, provavelmente decorrente das reações pozolânicas.

Observa-se que o avanço da frente de carbonatação nas primeiras idades, até aos 28 dias, é muito maior que para as demais idades. Este fato decorre da, provavelmente, presença de partículas de ACIGRAN que ainda não reagiram, e conseqüentemente não



proporcionaram o refino da estrutura. Ao longo do tempo, a velocidade de carbonatação tende a diminuir pela menor porosidade, resultante tanto das reações de hidratação do clínquer e da ACIGRAN, como do carbonato de cálcio que se deposita nos vazios, dificultando a penetração do CO<sub>2</sub>. O comportamento das argamassas de referência, a partir dos 56 dias, é devido provavelmente à variabilidade da medição, não expressando o seu real desempenho quanto à carbonatação.

#### **7.5.5.3 Conclusões**

A carbonatação de argamassas com ACIGRAN é influenciada pelo teor de substituição, pelo traço e idade das argamassas e pela interação entre as variáveis duas a duas.

Quanto maior o teor de substituição maior a profundidade de carbonatação. Este efeito é consequência, provavelmente, da menor reserva alcalina.

Quanto menor o consumo de cimento e de ACIGRAN, maior a profundidade de carbonatação, devido a uma porosidade bastante elevada destas argamassas.

A frente de carbonatação avança em uma maior velocidade até os 28 dias, devido ao fato das reações pozolânicas serem mais lentas e não terem sido completadas, e conseqüentemente ainda não se tem um refinamento completo da estrutura. Ao longo do tempo, o avanço da frente carbonatada se dá de forma mais lenta pelo refino da estrutura, tanto pelas reações de hidratação e pozolânicas, como pela presença do carbonato de cálcio que deposita-se nos poros.

#### **7.5.6 Resistência ao Sulfato**

O desempenho das argamassas frente à ação de sulfatos foi avaliado através da resistência à tração na flexão, por ser este um ensaio de maior sensibilidade ao fenômeno de fissuração/expansão (MEHTA e GJORV, 1974) seguindo a metodologia proposta por KOCH e STEINEGGER (1960), adaptada por IRASSAR (1990).

Dentre os diversos métodos existentes para avaliação do ataque por sulfatos em concretos e argamassas o método proposto por KOCH e STEINEGGER (1960) é considerado como o que mais aproxima-se da prática (JASPERS apud MOURA, 2000) e o que permite análises mais conclusivas (BRETANHA, 2000).

Foram moldados 6 corpos-de-prova prismáticos de (40 x 40 x 160) mm, conforme NBR 5738 (1994), para cada traço (1: 1,5; 1:3,0; 1:4,5) e teor de substituição de ACIGRAN (0%, 10%, 30%, 50%) analisado, mantidos em câmara úmida (umidade superior a 95 % e temperatura 23 ± 2° C) durante 28 dias.

Realizou-se a secagem superficial e a pesagem de cada corpo-de-prova, sendo 3 exemplares de cada traço e teor posteriormente imersos em solução de sulfato e de cal (referência), respectivamente.

A solução utilizada foi a recomendada pela ASTM C 1012 (1994), que especifica sulfato de sódio com concentração de 5 %, na proporção de quatro volumes de solução para cada volume de corpo-de-prova.

Como controle da agressividade da solução fixou-se o pH entre 7 e 8, de acordo com MOURA (2000).

A manutenção deste foi feita através de titulação com solução de ácido sulfúrico de concentração de 1N (SILVEIRA, 1996), medido através de papel indicador de pH universal.

Mensalmente os corpos-de-prova eram removidos da solução e realizados os mesmos procedimentos de pesagem e feita a troca da solução.

Inicialmente, o controle do pH foi feito diariamente, passando a 48 h. Isto porque as reações do concreto/ argamassa com a solução vão se tornando mais estáveis ao longo do tempo (BRETANHA, 2000).

Após o período de 270 dias os corpos-de-prova foram removidos das soluções e rompidos à tração na flexão (NBR 12142, 1991).

#### 7.5.6.1 Apresentação dos resultados

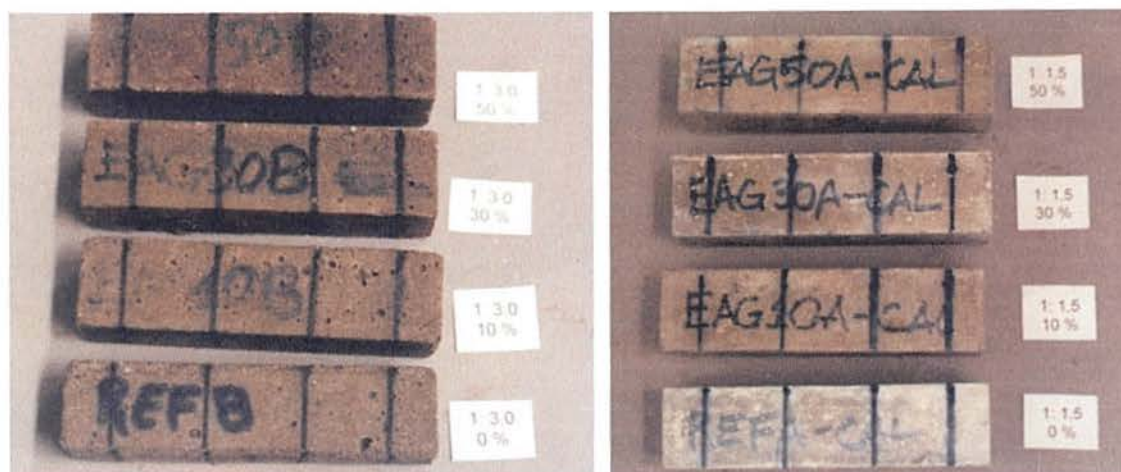
As figuras 7.79 a 7.81 mostram o aspecto dos corpos-de-prova após imersos em solução durante 270 dias.

Observa-se nos corpos-de-prova imersos em solução com sulfato, uma leve erosão superficial, sendo o traço de menor consumo de cimento, o mais desgastado. Entretanto, não visualizou-se fissuras superficiais.

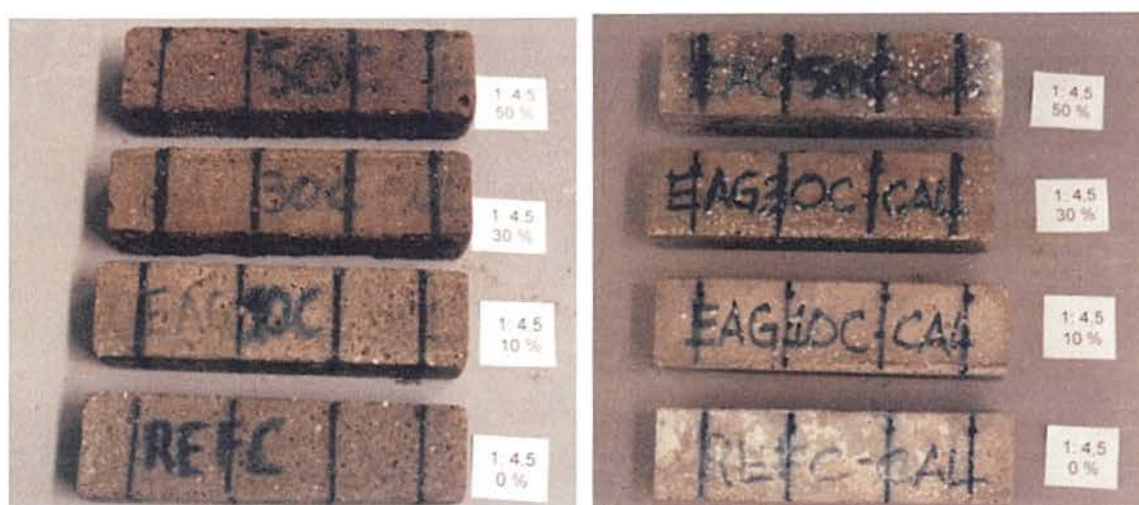


**Figura 7.79** Aspecto das argamassas de traço 1:1,5 após 270 dias imersos em solução de (a) 5 %  $\text{NaSO}_4$  e (b) água com cal





**Figura 7.80** Aspecto das argamassas de traço 1:3,0 após 270 dias imersos em solução de (a) 5 %  $\text{NaSO}_4$  e (b) água com cal



**Figura 7.81** Aspecto das argamassas de traço 1:4,5 após 270 dias imersos em solução de (a) 5 %  $\text{NaSO}_4$  e (b) água com cal

A tabela 7.32 apresenta os resultados da resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova imersos em solução com 5%  $\text{NaSO}_4$  e água com cal.

**Tabela 7.32** Resistência à tração na flexão de corpos-de-prova submersos em solução 5 % de NaSO<sub>4</sub> e água com cal

		Solução de Sulfato			Solução de Cal		
		Resistência Flexão (MPa)	Resistência Flexão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Resistência Flexão (MPa)	Resistência Flexão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1:1,5	0 %	9,70	9,97	4,28	6,97	6,77	10,16
		9,75			7,33		
		10,46			6,00		
	10 %	9,62	9,08	10,4	8,17	7,91	3,85
		7,99			7,58		
		9,63			8,00		
	30 %	10,13	9,69	9,36	8,26	8,46	6,79
		10,28			9,10		
		8,64			8,01		
	50 %	10,48	10,34	4,25	9,34	8,86	7,44
		10,69			8,11		
		9,84			9,14		
1:1,3	0 %	4,63	4,34	9,61	5,13	5,13	10,79
		4,53			5,68		
		3,86			4,58		
	10 %	5,54	5,54	11,9	5,94	6,30	6,88
		6,21			6,66		
		4,88			6,30		
	30 %	6,77	6,50	10,08	6,10	6,58	4,53
		6,98			7,00		
		5,76			6,65		
	50 %	6,53	6,31	3,13	6,65	6,79	13,26
		6,14			6,58		
		6,25			7,14		
1:4,5	0 %	1,66	2,05	23,04	3,32	3,52	10,4
		2,58			3,29		
		1,92			3,94		
	10 %	2,23	2,48	11,25	4,33	3,88	13,27
		2,78			3,32		
		2,44			3,98		
	30 %	4,36	3,87	17,72	4,28	4,28	1,86
		3,08			4,20		
		4,16			4,36		
	50 %	4,15	4,08	12,38	4,70	5,17	11,43
		3,54			4,98		
		4,55			5,83		

#### 7.5.6.2 Análise e discussão dos resultados

Foi realizada análise de variância para determinar a influência do traço, teor e tipo de solução nos resultados de tração na flexão dos corpos-de-prova. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 7.33.



**Tabela 7.33** Análise estatística através do ANOVA dos resultados da resistência à tração na flexão de argamassas submetidas ao ataque por sulfato

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Traço	2	164,2547	561,9700	2,91	S
Teor	3	9,4747	32,4159	2,81	S
Solução	1	0,0457	0,1563	4,05	NS
Traço x Teor	6	0,5114	1,7496	2,31	NS
Traço x solução	2	13,7599	47,0773	2,91	S
Teor x solução	3	0,3899	1,3341	2,81	NS
Traço x teor x solução	6	0,7595	2,5985	2,31	S
Erro	48	0.292284			

**Gdl:** Grau de Liberdade

**MQ:** Média Quadrática

**F<sub>calc</sub>:** Valor calculado de F

**F<sub>0,05</sub>:** Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

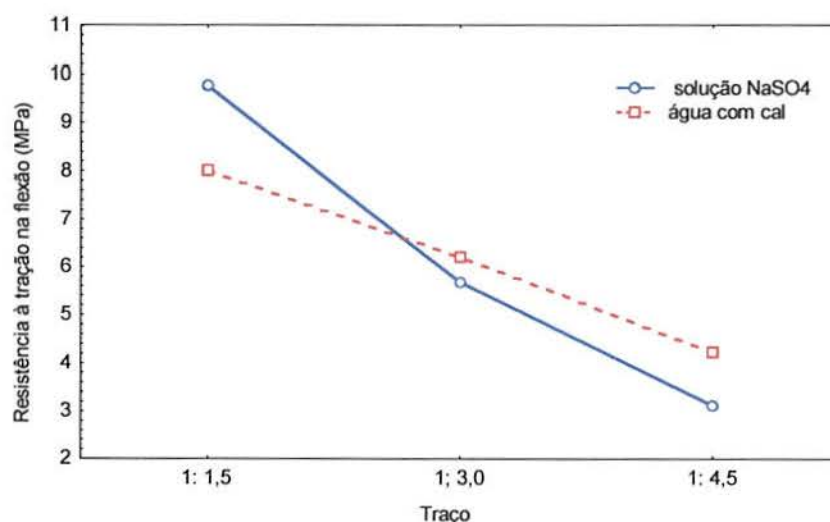
**S:** Significativo

**NS:** Não Significativo

**\*Significância:** F<sub>calc</sub> > F<sub>0,05</sub> : S

F<sub>calc</sub> < F<sub>0,05</sub> : NS

Como em todas as outras propriedades analisadas, o traço apresenta influência significativa. Quanto maior o consumo de cimento e menor relação água/aglomerante, maior a resistência à tração na flexão. A figura 7.82 ilustra o comportamento das argamassas, submersas em cal e em solução com sulfato, em relação à resistência à tração na flexão em função do traço.

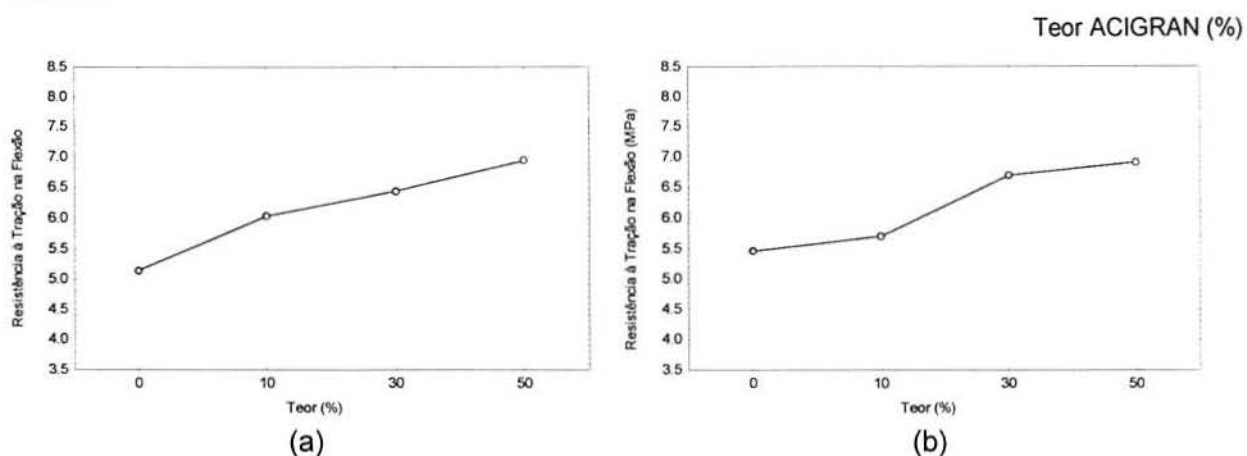


**Figura 7.82** Efeito do tipo de solução na resistência à tração na flexão

No traço 1:1,5 verifica-se que os corpos-de-prova submetidos à cura em solução com sulfato apresentaram resistência à flexão superior aos com cura em cal, alcançando um ganho de resistência na ordem de 47 % para o caso das argamassas de referência. Este comportamento ocorre, provavelmente, pelo fato que os compostos expansivos formados pela ação dos íons sulfatos sobre o cimento hidratado, cuja principal reação é com hidróxido de cálcio ( $Na_2SO_4 + Ca(OH)_2 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2NaOH$ ), estarem em quantidade capaz de preencher os vazios, provocando uma densificação da matriz, sendo o aumento de

volume por eles proporcionados ainda absorvido pelos vazios existentes, sem provocar fissuras. Este comportamento inverteu-se para os traços 1:3,0 e 1: 4,5, pelo fato destes traços possuírem uma elevada porosidade, favorecendo o acesso da solução com íons sulfatos. Os vazios existentes na pasta não foram capazes de acomodar a etringita formada e a expansão por ela gerada, o que acaba provocando o aparecimento de fissuras, com a conseqüente diminuição da resistência.

Quanto ao teor de substituição, ao contrário do comportamento na resistência à compressão e absorção por sucção capilar (método de Kelham), apresenta influência significativa nos resultados de resistência ao ataque por sulfatos. O efeito positivo que o acréscimo do teor de substituição proporciona pode ser visualizado na figura 7.83. A ação benéfica da incorporação da ACIGRAN, verificada tanto para os corpos-de-prova curados em cal como em sulfato, em relação a esta propriedade deve-se provavelmente ao efeito físico e químico proporcionado pela ACIGRAN. Do ponto de vista físico, através do refinamento da estrutura, ocasionado pelas reações pozolânicas, pelo efeito de empacotamento, decorrente do posicionamento da ACIGRAN entre os grãos de cimento, diminuindo os espaços disponíveis para água, densificando a pasta de cimento e pela atuação da ACIGRAN como pontos de nucleação, estimulando a hidratação de um maior número de partículas de cimento simultaneamente. Do ponto de vista químico por possuir um menor teor de hidróxido de cálcio, composto este, mais vulnerável ao ataque de íons sulfatos.



**Figura 7.83** Efeito do teor de ACIGRAN na resistência à tração na flexão de argamassas imersas em (a) solução de NaSO<sub>4</sub> e (b) água com cal

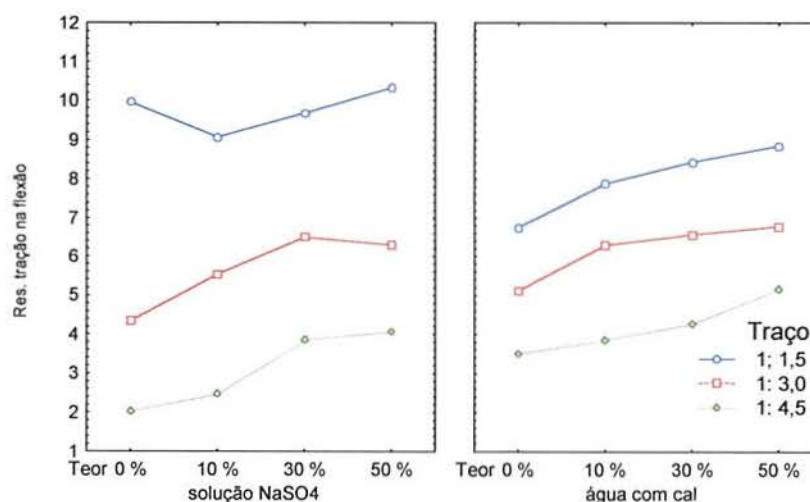
A figura 7.84 apresenta a interação entre o traço, o teor de ACIGRAN e a solução na qual as argamassas foram imersas. O ganho de resistência com o aumento do teor de ACIGRAN, nas argamassas imersas em cal, está associada possivelmente às reações pozolânicas da ACIGRAN, proporcionando um aumento de cerca de 47 %, em relação à argamassa de referência, para o traço 1:4,5. Para este traço observa-se que as argamassas imersas em solução de sulfato apresentaram menor resistência à tração na flexão do que às

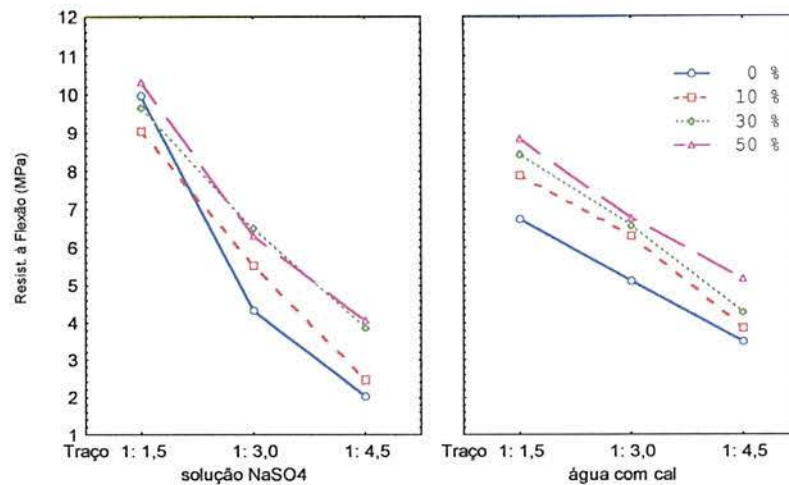


curadas em cal, para todos os teores, sendo que quanto maior o teor de ACIGRAN, menor a diferença entre as resistências. Este fato está associado, provavelmente, à formação da etringita nos vazios existentes das argamassas, cujas expansões já estão provocando tensões e fissuração, sendo responsáveis pela diminuição da resistência. Para o traço 1:3,0, as argamassas de referência e com 10 % de ACIGRAN apresentam a mesmo comportamento que o traço de menor consumo de cimento, reduzindo a diferenças entre as resistências, à medida que aumenta o teor de ACIGRAN. Para os traços de maior consumo de cimento, verifica-se um aumento da resistência à tração na flexão nas argamassas imersas em solução de sulfato, sendo este comportamento provavelmente decorrente de uma menor porosidade causada pela densificação da matriz, promovendo um menor acesso dos íons sulfatos, e pelo menor teor de hidróxido de cálcio, quando do aumento do teor da ACIGRAN. Desta forma, a formação do gesso como consequência da ação do sulfato sobre o hidróxido de cálcio é menor, mas suficiente para preencher os poros remanescentes, sem causar esforços de tração pela reação expansiva, o que viria a fissurar a matriz, reduzindo a resistência.

Na figura 7.84, fica evidenciado a participação positiva da ACIGRAN como substituição ao cimento, sendo bastante significativa para o traço intermediário e de menor consumo de cimento, onde acarretou um acréscimo de até 50% e 100 %, respectivamente, na resistência à tração na flexão das argamassas submersas em solução de sulfato.

Para estes traços, através de uma análise de comparação de médias, método Duncan, verifica-se que os valores obtidos diferem estatisticamente entre si, com exceção dos teores de 30 e 50 % de substituição.





**Figura 7.84** Efeito da interação do teor de ACIGRAN, traço e solução de imersão dos corpos-de-prova

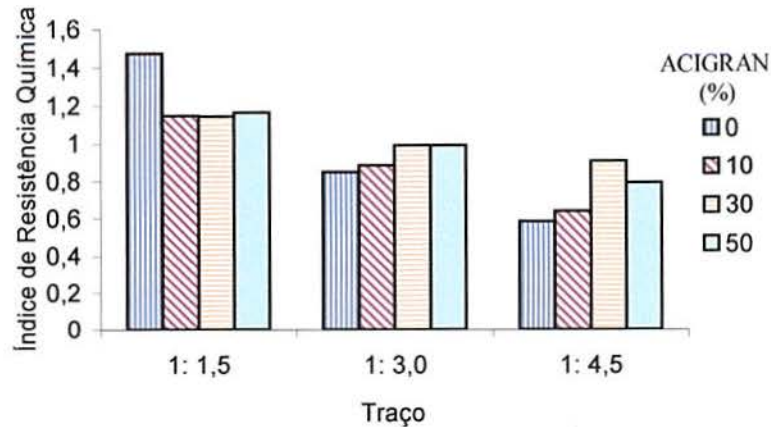
Um parâmetro que pode ser empregado na avaliação da resistência do concreto ao ataque por sulfato é o índice de resistência química "R" (IRASSAR, 1990), ou também chamado de fator de deterioração por sulfato (RASHEEDUZZAFAR et al.,1990), o qual é calculado a partir do quociente da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova imersos na solução de sulfato pela resistência à tração na flexão de corpos-de-prova imersos em água com cal. Quanto mais próximo da unidade for este índice, melhor será o comportamento das argamassas ou concretos frente à ação de íons sulfatos.

A tabela 7.34 e figura 7.85 apresentam os índices da resistência química "R" de argamassas com escórias.

**Tabela 7.34** Índice de resistência química de argamassas com escórias ACIGRAN

Traço	Teor (%)	R
1: 1,5	0	1.47
	10	1.15
	30	1.15
	50	1.17
1: 3,0	0	0.85
	10	0.88
	30	0.99
	50	0.93
1: 4,5	0	0.58
	10	0.64
	30	0.90
	50	0.79





**FIGURA 7.85** Índice de resistência química de argamassas com escórias ACIGRAN

Verifica-se que as argamassas de traço 1:1,5 apresentaram índices de resistência superiores a 1, sendo que a argamassa de referência foi a que atingiu o maior valor. Isto se deve ao fato do ganho de resistência das argamassas curadas em sulfato em relação às imersas em cal ser bem maior para as argamassas de referência do que para as argamassas com ACIGRAN, o que indica uma maior formação de etringita nas argamassas de referência, sem ainda resultar em queda de resistência devido à superação da resistência à tração das argamassas pelos esforços de tração gerados pela expansão.

Para verificar a influência das variáveis analisadas sobre o índice de resistência química realizou-se a ANOVA, cujos resultados encontram-se resumidos na tabela 7.35.

**Tabela 7.35** Análise estatística através do ANOVA do índice de resistência química das argamassas

FATOR	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância*
Traço	2	0,782	48,863	3,40	S
Teor	3	0,022	1,401	3,01	NS
Traço x Teor	6	0,066	4,125	2,51	S
Erro	24	0,016			

**Gdl:** Grau de Liberdade

**MQ:** Média Quadrática

**Fcalc:** Valor calculado de F

**F0,05:** Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

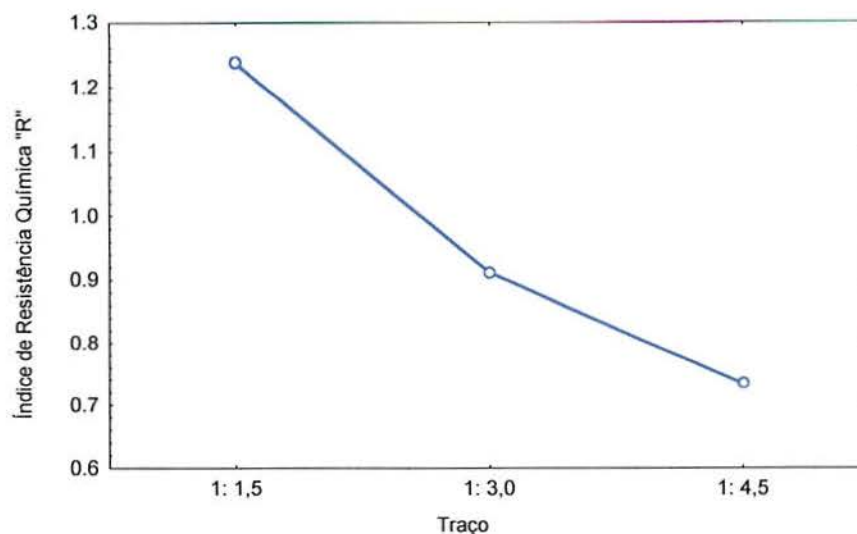
**S:** Significativo

**NS:** Não Significativo

**\*Significância:** Fcalc > F0,05 : S

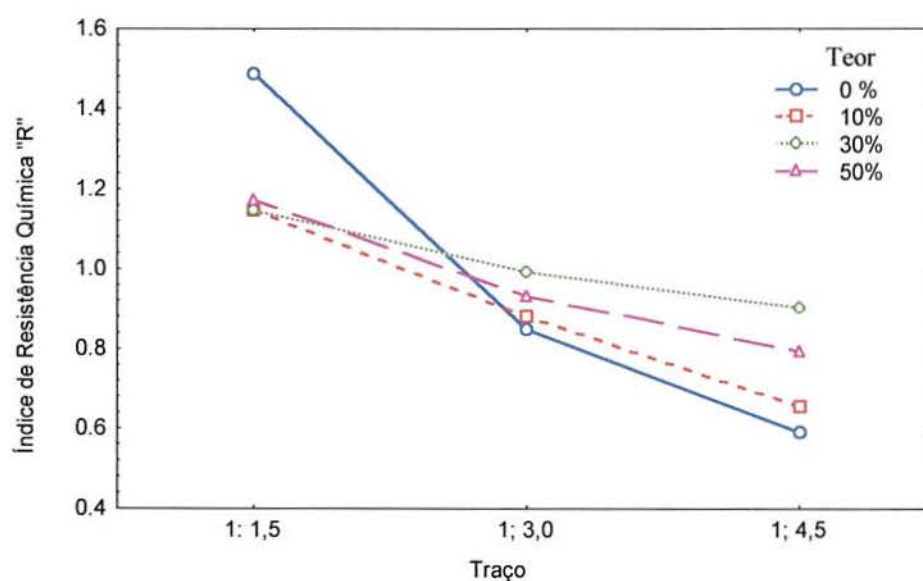
Fcalc < F0,05 : NS

A medida que aumenta-se o traço há uma diminuição do "R", como pode ser visto na figura 7.86, sendo este resultado coerente ao encontrado em todas as propriedades.



**Figura 7.86** Efeito do traço no índice de resistência química "R"

O teor isoladamente não apresenta diferenças significativas, entretanto sua interação com o traço influencia os resultados de resistência química. As diferenças existentes acentuam-se à medida que diminui o consumo de cimento, com exceção do traço 1: 1,5, onde o "R" para argamassa de referência (0%) é superior aos demais. Ao analisar-se, por tipo de solução na qual as argamassas foram imersas (figura 7.84), verifica-se que este incremento observado não se refere ao aumento de resistência ao sulfato, mas sim à estrutura de poros reduzida pelo preenchimento com compostos expansivos cujas tensões de tração ainda não são suficientes para iniciar a propagação de fissuras. De todos, a que apresentou melhor comportamento foi a argamassa com 30% de ACIGRAN, como pode ser visualizado na figura 7.87.



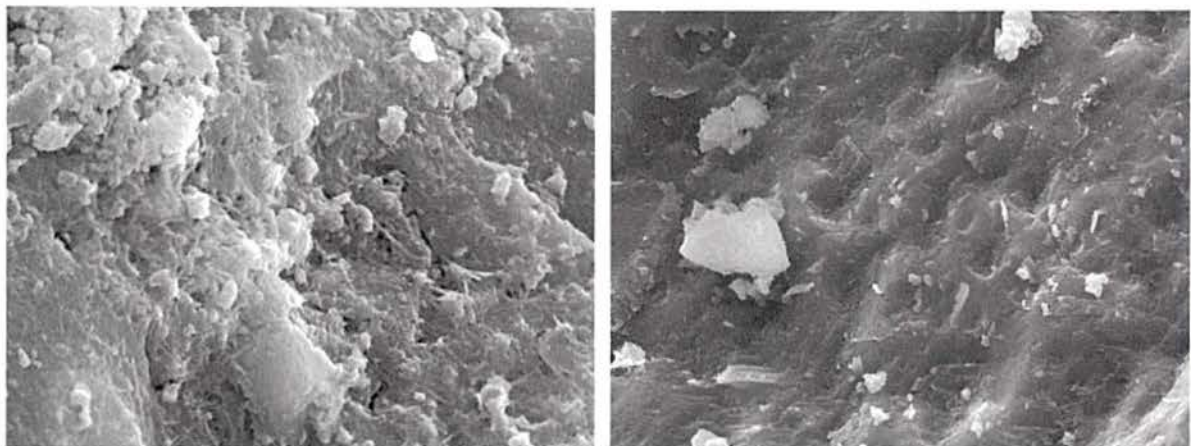
**Figura 7.87** Influência da interação do traço e do teor das argamassas no índice de resistência química "R"



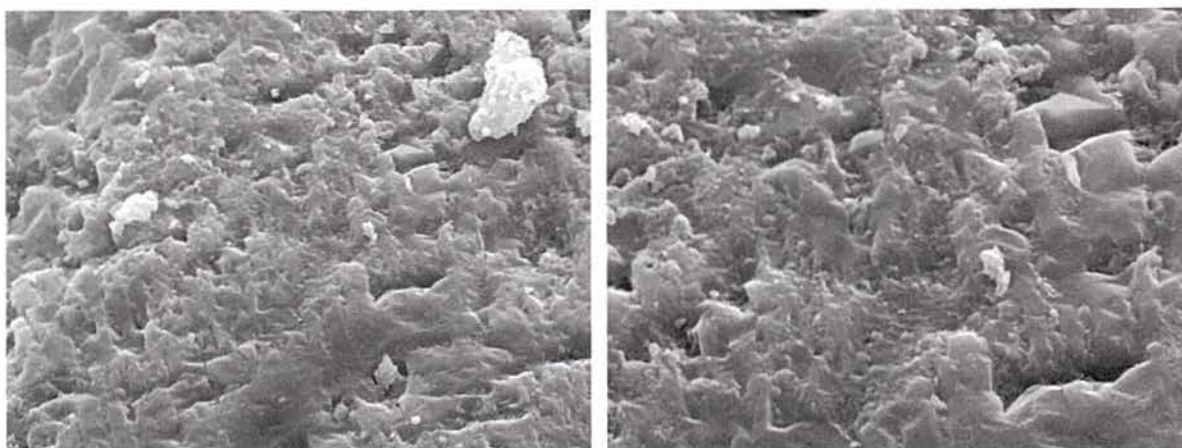
A ação da escória ACIGRAN confirma a posição de alguns pesquisadores a favor da utilização de adições para melhorar a resistência a sulfatos (ELLIS Jr., 1992, MEHTA e MONTEIRO, 1994). A causa envolve três fatores (ELLIS Jr, 1993): a redução do conteúdo de hidróxido de cálcio pela reação pozolânica, a diminuição do teor de  $C_3A$  e a diminuição da porosidade capilar. A ACIGRAN atende duas destas características, com exceção ao teor de alumina que é superior aos do cimento CP I S. Entretanto, não observou-se influência significativa do teor nas propriedades avaliadas.

Analisando dentro do contexto de minimização de teores de  $C_3A$  em cimentos para melhorar o desempenho quanto à resistência ao ataque por sulfatos, a utilização de escórias de alto-forno seria inadequada para melhoria desta propriedade, uma vez que apresentam teores superiores ao do clínquer. Entretanto, na realidade isto não ocorre, por que existe uma diferença entre a alumina do clínquer e da escória. Nesta última, durante a hidratação, a alumina forma solução sólida com o gel de silicato de cálcio hidratado que são muito mais resistentes ao ataque por sulfato (CATTANEO e FRIGIONE, 1983).

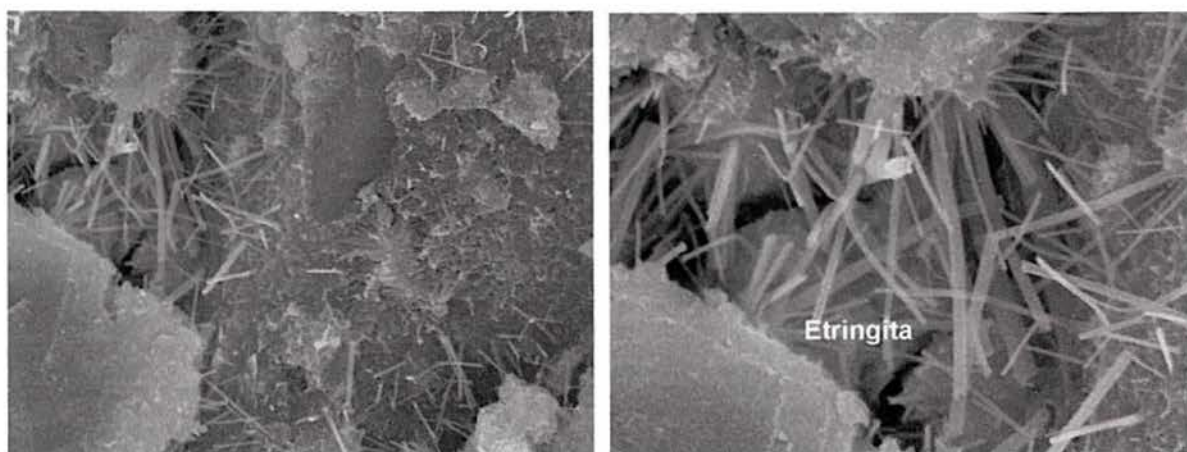
As figuras 7.88 a 7.91 mostram, respectivamente, as micrografias das argamassas de traço 1: 1,5 com os teores de 0, 10, 30 e 50 % de substituição de cimento por ACIGRAN. Observa-se uma estrutura bastante densa, em função da baixa relação água/aglomerante de 0,4. Verificou-se pouca presença de etringita, com exceção da argamassa com 30% de ACIGRAN, que apresentaram etringita.



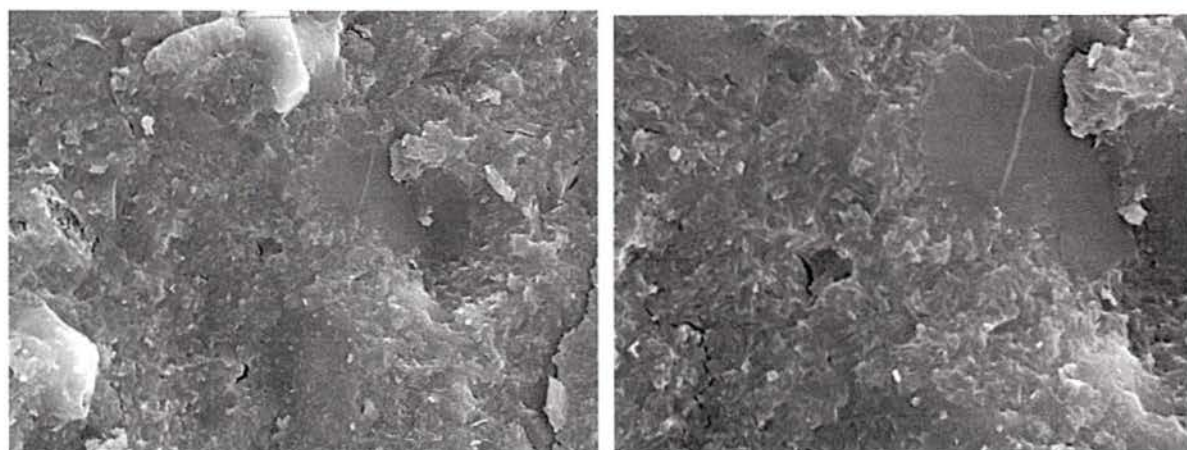
**Figura 7.88** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 1,5 (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x



**Figura 7.89** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 1,5 com 10% de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x



**Figura 7.90** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 1,5 com 30 % de ACIGRAN, identificando a existência de etringita livre (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x

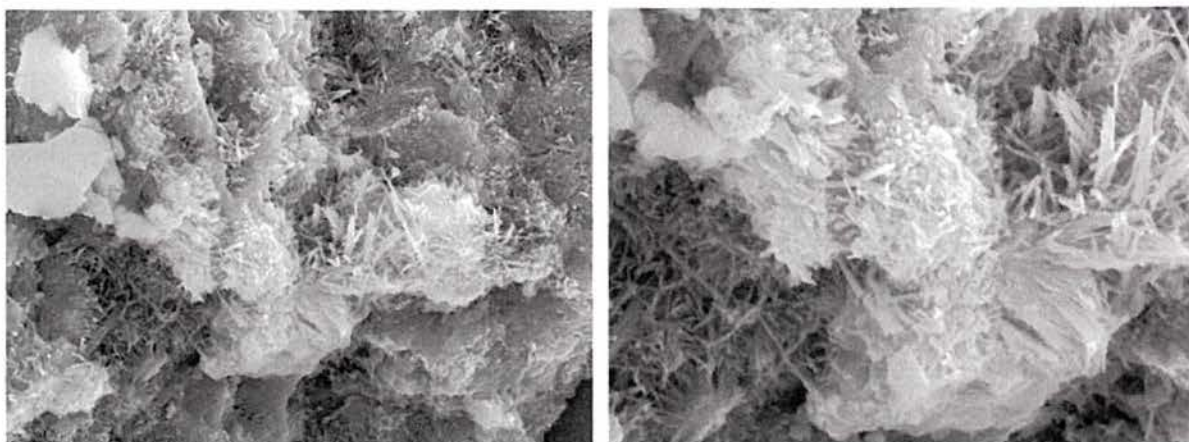


**Figura 7.91** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 1,5 com 50 % de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x

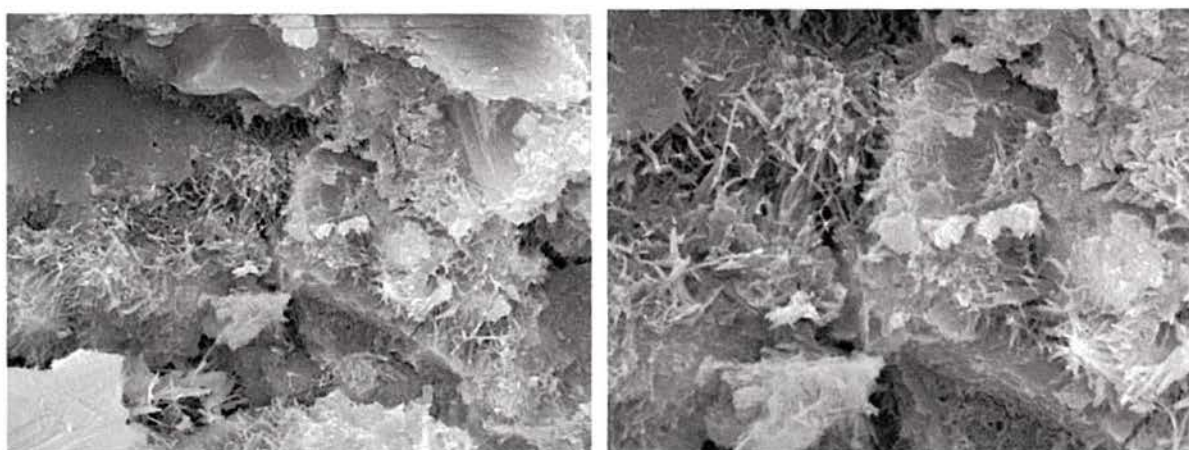
As figuras 7.92 a 7.95 ilustram a microestrutura das argamassas de traço 1: 3,0 após ficarem imersas em solução de sulfato durante 270 dias. Verifica-se que a argamassa de



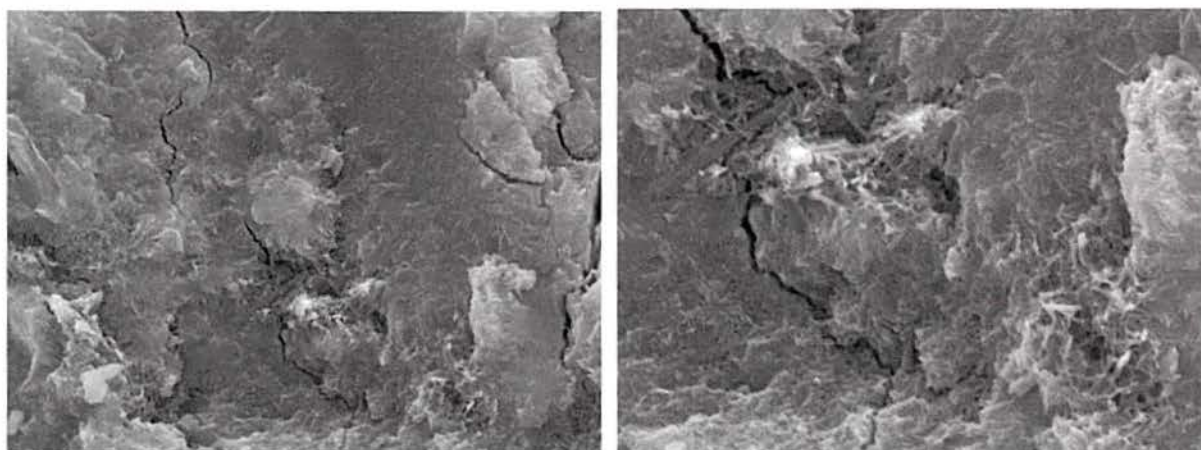
referência apresenta uma estrutura menos densa que as com ACIGRAN, diminuindo a porosidade e a presença de etringita à medida que vai aumentando o teor desta.



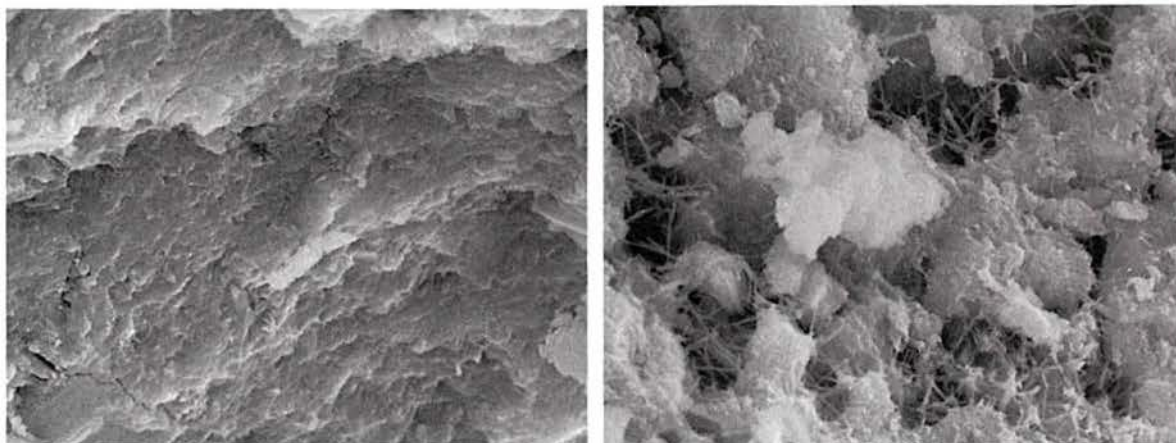
**Figura 7.92** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 3,0 (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x



**Figura 7.93** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 3,0 com 10 % de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x

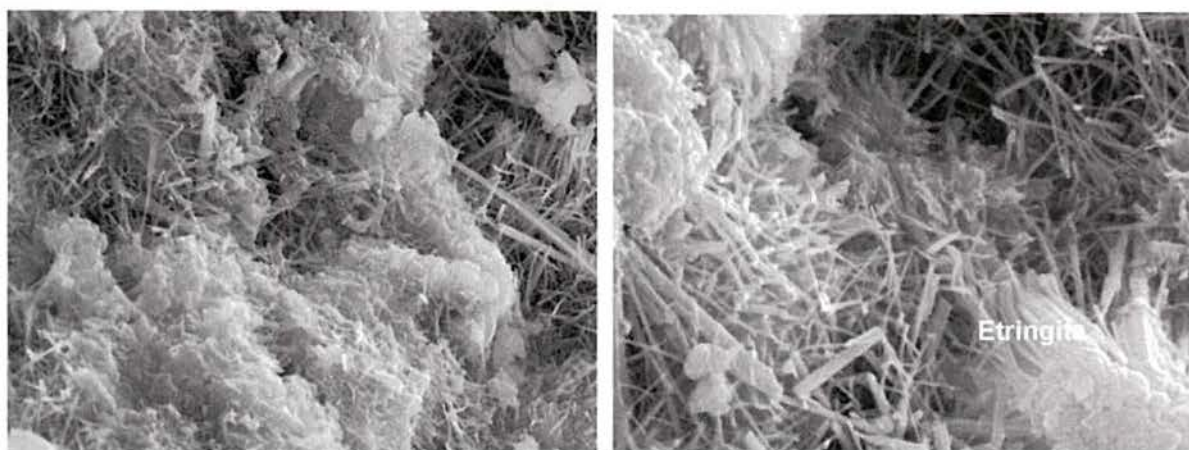


**Figura 7.94** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 3,0 com 30 % de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x



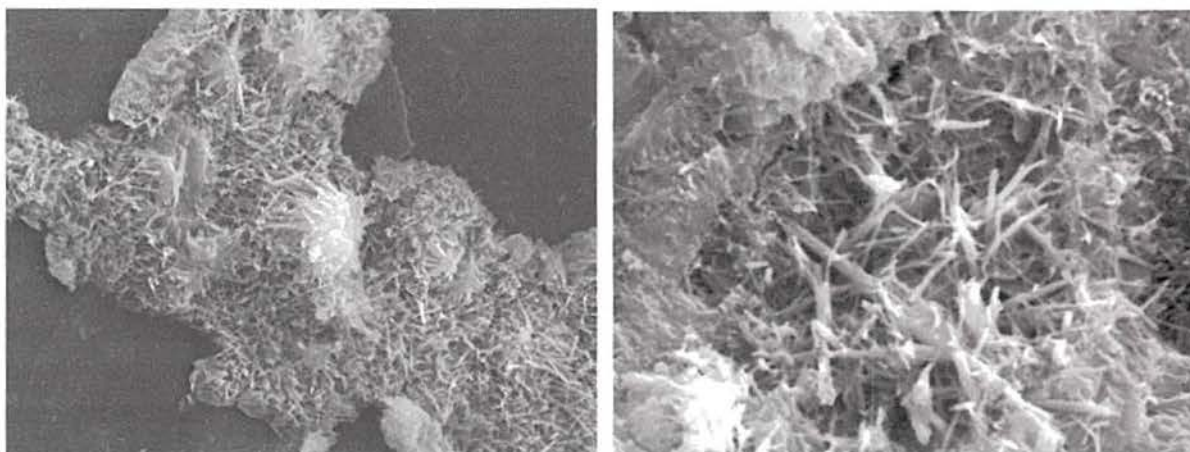
**Figura 7.95** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 3,0 com 50 % de ACIGRAN **(a)** magnitude 5000 x **(b)** 10000 x

Nas figuras 7.96 a 7.98 observa-se etringita de diferentes morfologias e em quantidades superiores aos dos traços 1: 1,5 e 1: 3,0. Na figura 7.96 observa-se longas agulhas de cristais de etringita, apresentando esta forma em função da presença de vazios para ela se desenvolver, além da etringita na forma de pacote (7.96 (b)), segundo LOUARN (1993). Na figura 7.100 observa-se etringita livre, mas mostrando a tendência de posicionar-se paralelamente ao agregado, devido a um menor espaço disponível.



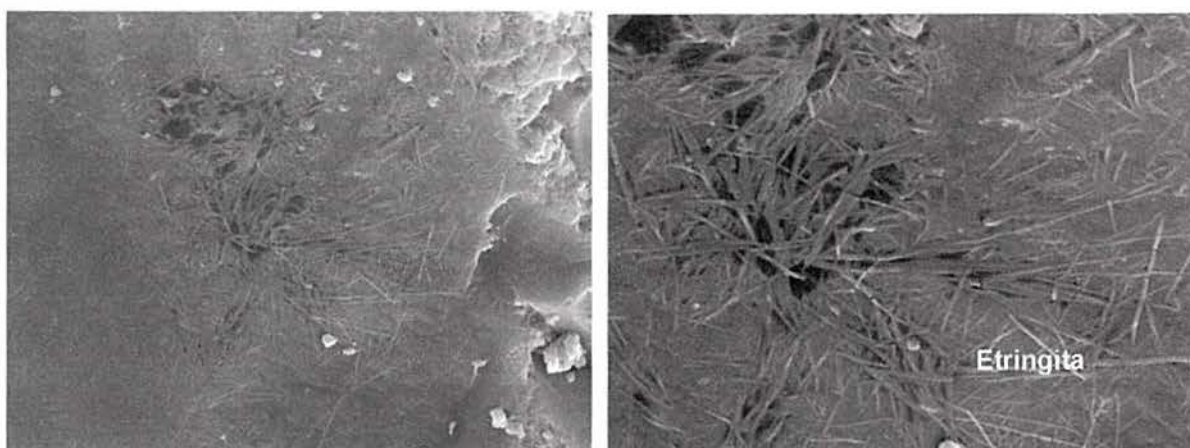
**Figura 7.96** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 4,5 **(a)** magnitude 5000 x **(b)** 10000 x





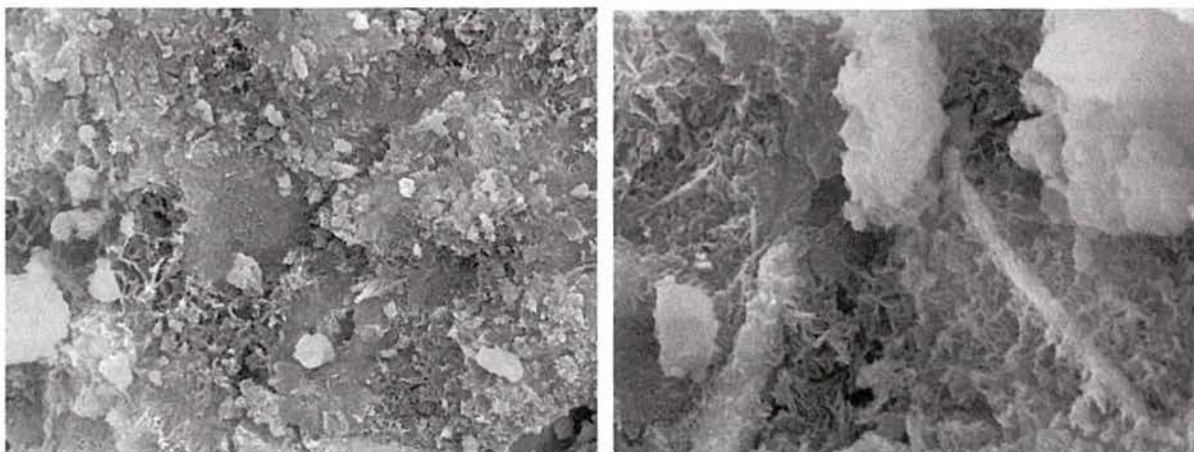
**Figura 7.97** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 4,5 com 10 % de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x

A figura 7.98 mostra a estrutura bem mais densa da argamassa com 1: 4,5 com 30 % de ACIGRAN, com pequena quantidade de etringita. A etringita identificada é do tipo compacta, segundo LOUARN (1993).



**Figura 7.98** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 4,5 com 30 % de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x

A figura 7.99 evidencia que os altos teores de ACIGRAN proporcionam uma estrutura mais densa, diminuindo a porosidade, dificultando a penetração da solução com íons sulfato e diminuindo o espaço livre para a formação das agulhas de etringita.



**Figura 7.99** Micrografia eletrônica de varredura com elétrons secundários da argamassa de referência 1: 4,5 com 50 % de ACIGRAN (a) magnitude 5000 x (b) 10000 x

### 7.5.6.3 Conclusões

A resistência à tração na flexão de corpos-de-prova submersos em solução de sulfato e de água de cal é influenciada pelo traço, sendo diretamente proporcional ao consumo de cimento.

O teor de substituição de ACIGRAN apresenta influência significativa na resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova após terem ficados imersos 270 dias em solução sulfato, decorrente do somatório do efeito físico de refinamento e efeito químico, devido a um menor teor de hidróxido de cálcio.

A ação da ACIGRAN é mais efetiva para os traços com menor consumo de cimento.

Ao analisar o índice de resistência química, que relaciona a resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova imersos em solução de sulfatos e de cal, apesar do teor não ter influência significativa neste parâmetro, percebe-se que a substituição por ACIGRAN apresentou melhor desempenho nos traços 1: 3,0 e 1: 4,5.

## 7.6 RESUMO DAS PROPRIEDADES ESTUDADAS

A tabela 7.36 apresenta, esquematicamente, um resumo das propriedades das argamassas com ACIGRAN avaliadas ao longo da tese.

Observa-se que todas as propriedades avaliadas são influenciadas pelo traço, ou seja, pelo consumo de cimento e relação água/aglomerante.

O mesmo não se verifica para o teor de substituição de ACIGRAN, o qual influenciou apenas as propriedades ligadas à durabilidade, quais sejam: carbonatação, absorção por imersão e sulfato. Em relação às duas últimas propriedades, o acréscimo no teor de substituição provoca uma melhoria destas propriedades. Ao contrário da frente de



carbonatação que aumentou com o teor de ACIGRAN, provavelmente devido a diminuição da reserva alcalina.

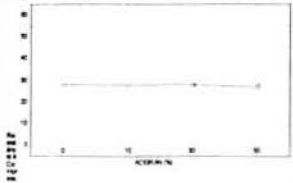
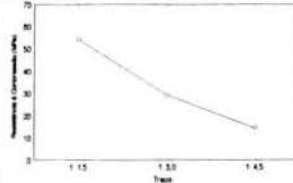
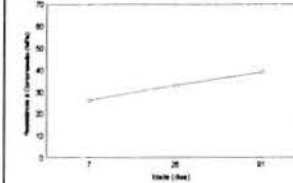
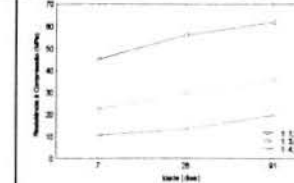
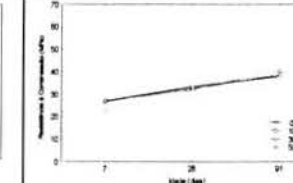
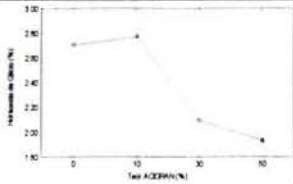
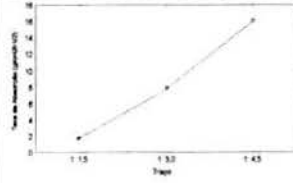
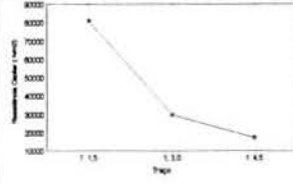
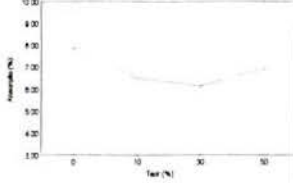
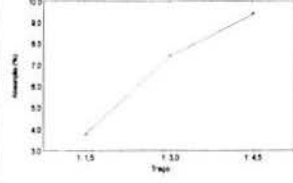
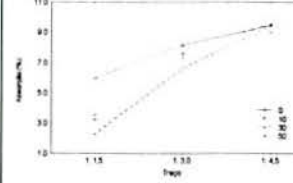
A idade influenciou significativamente a resistência à compressão e a carbonatação.

Algumas interações mostraram influência significativa sobre as propriedades estudadas, quais sejam:

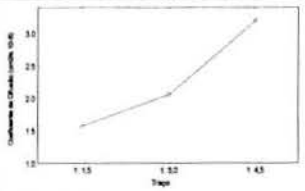
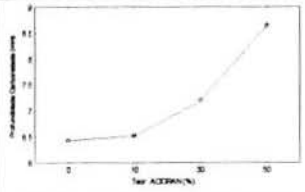
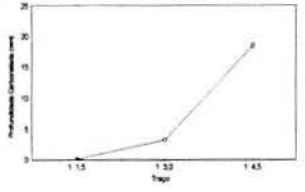
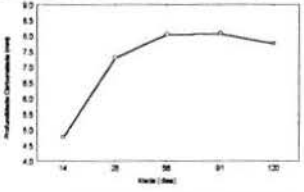
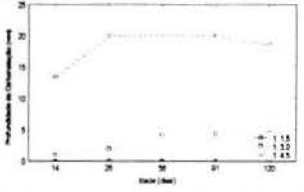
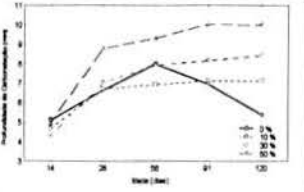
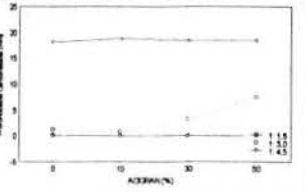
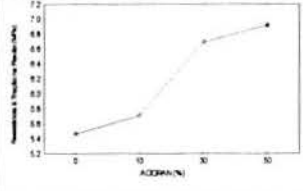
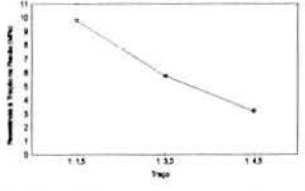
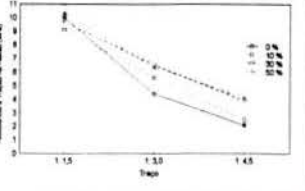
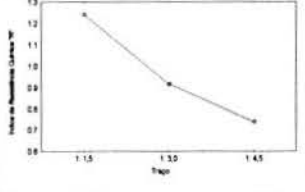
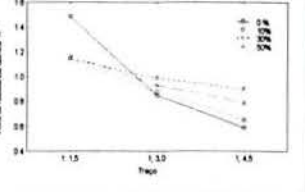
- Resistência à compressão: idade x traço e idade x teor;
- Absorção por imersão: teor x traço;
- Carbonatação: idade x traço, idade x teor e teor x traço;
- Resistência à sulfatos (resistência à tração na flexão): teor x traço;
- Índice químico: teor x traço.

Com base nas propriedades estudadas verifica-se o efeito benéfico por parte da incorporação da ACIGRAN a argamassas, mostrando a viabilidade técnica do seu uso. Novos estudos devem ser realizados, buscando corroborar e complementar os resultados obtidos.

Tabela 7.37 Quadro esquemático das propriedades estudadas

	Teor	Traço	Idade	Idade x Traço	Idade x Teor	Teor x Traço
Resistência						NS
% Hidróxido de Cálcio						
Taxa de Absorção (Mét. Kelham)	NS					NS
Resistência Capilar	NS					
Absorção por Imersão						



	Teor	Traço	Idade	Idade x Traço	Idade x Teor	Teor x Traço
<b>Coeficiente de Difusão</b>	NS					NS
<b>Carbonatado</b>						
<b>Resistência a Sulfatos</b>						
<b>Resistência Química</b>	NS					

NS : Não significativo

## 8 CONCLUSÕES

Desenvolvimento sustentável é um conceito abrangente que resume a preocupação existente com a preservação ambiental. Entretanto, ainda é pequena a adesão do meio técnico e da sociedade como um todo nesta política.

Desta forma, urge soluções para evitar o consumo desenfreado de matérias-primas naturais não renováveis. A reciclagem de resíduos, em especial de escórias de aciaria elétrica, adequa-se perfeitamente dentro deste contexto, mostrando-se apropriada para ser utilizada como substituição ao cimento.

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes ao processo de estabilização da expansibilidade das escórias de aciaria elétrica, assim como a viabilidade técnica de uso da escória de aciaria elétrica granulada como substituição ao cimento.

As conclusões aqui apresentadas dizem respeito aos materiais, técnicas empregadas e propriedades analisadas. Novas pesquisas devem ser realizadas buscando confirmar a sua representatividade, bem como complementar as informações obtidas.

A seguir são apresentados as conclusões deste trabalho.

### 8.1 QUANTO AO RESFRIAMENTO E A ESCÓRIA GERADA (ACIGRAN)

A alteração do processo de resfriamento lento para rápido faz com que a organização molecular da escória passe de uma estrutura cristalina para amorfa.

A ACIGRAN apresentou um alto teor de fase vítrea, atingindo um grau de vitrificação de 98,38 %.

Não se observou nenhuma diferença do ponto de vista microestrutural das escórias granuladas, beneficiadas (àquelas que foram submetidas à passagem por uma correia com eletroimã para remoção da fase metálica) ou não.

O sistema de resfriamento brusco mostrou-se válido para escórias oxidante de aciaria elétrica de diferentes siderúrgicas.

A participação do carbono e silício no processo de resfriamento favorece a redução, entre outros elementos, do ferro, propiciando uma recuperação de 30% de fase metálica, em massa.

A fase metálica separada, em média em torno de 30% é constituída de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) e ferro ( $\text{Fe}$ ).

A composição química da ACIGRAN consiste basicamente de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$  e apresenta, praticamente, a mesma faixa de compostos que a escória de alto-forno.



A ACIGRAN é classificada, segundo a norma 10004/1987, como resíduo Classe II – Não Inerte.

A massa específica da escória passou de 3,47 a 2,90 kg/dm<sup>3</sup>.

O resfriamento brusco neutraliza possíveis problemas de expansão decorrente da transformação do silicato di-cálcico da fase  $\beta$  para  $\gamma$ .

Os teores de óxido de cálcio livre são muito baixos, praticamente nulos, não implicando em problemas de desintegração. Comportamento este comprovado em todos os ensaios de expansão realizados.

Como o óxido de magnésio não se encontra na forma cristalina de periclásio, este não apresenta o problema de expansão.

A escória granulada atendeu as exigências da NBR 5720/1991 quanto ao índice de hidraulicidade ser superior a 1,4, calculado em função da sua composição química, assim como outros índices propostos por distintos autores.

As argamassas com 50 % de substituição de cimento por ACIGRAN não apresentaram ou quando verificado, uma porcentagem ínfima de expansão pelos métodos analisados, quais sejam, agulhas Le Chatelier, ensaio das barras, ensaio da autoclave e ensaio de dilatação em água.

## **8.2 QUANTO ÀS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS COM ACIGRAN NO ESTADO FRESCO**

O uso de ACIGRAN aumentou a trabalhabilidade das argamassas. Quanto maior o teor de ACIGRAN, menor a quantidade de água requerida para uma mesma consistência. Este comportamento foi observado nos três traços analisados, 1: 1,5, 1: 3,0, 1: 4,5, sendo mais evidenciado para o traço 1: 4,5, onde para 50% de substituição, verificou-se uma diminuição na relação água/ aglomerante igual a 0,05.

## **8.3 QUANTO ÀS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS COM ACIGRAN NO ESTADO ENDURECIDO**

### **8.3.1 Características Físicas e Propriedades Mecânicas**

Do ponto de vista físico e mecânico a incorporação de ACIGRAN propiciou igual ou melhor comportamento das argamassas ao serem comparadas com a de referência, sem ACIGRAN.

A ACIGRAN apresenta propriedades hidráulicas e pozolânicas e proporciona, através de efeito físico, o refinamento da estrutura de poros.

O índice de atividade pozolânica da argamassa com substituição de 35 % de cimento por ACIGRAN foi de 119 %.

A análise microscópica mostrou que pastas com teor de 50 % de substituição apresentaram uma estrutura bem mais densa do que os demais teores.

Não houve diferença significativa nos valores de resistência à compressão com a incorporação de ACIGRAN, independente do teor de substituição.

O consumo de hidróxido de cálcio das pastas analisadas diminui com o aumento do teor de substituição.

A idade das pastas não influencia no teor de hidróxido de cálcio.

O pH não sofre influência, estatisticamente significativa, do teor de ACIGRAN e da idade.

Para idade de 28 dias, a água não evaporável e o teor de sólidos não sofrem influência significativa do teor de ACIGRAN e da idade.

As escórias de alto-forno, para um mesmo tempo de moagem, apresentam diâmetro médio superior ao da ACIGRAN, encontrando-se o valor de 31,17 $\mu$ m para escória de alto-forno e de 4,83 $\mu$ m para ACIGRAN.

Argamassas com ACIGRAN, quando comparadas com argamassas com escórias de alto-forno, apresentam melhor desempenho em relação à resistência à compressão, tanto aos 7 como aos 28 dias, apresentando um acréscimo de até 26 % nos valores das resistências. Quanto menor o consumo de cimento no traço menor a diferença, entre os níveis de resistência, igualando-se no traço mais pobre analisado.

As argamassas com ACIGRAN são consideradas, conforme NBR 10004/1987, como material inerte.

### **8.3.2 Durabilidade**

A incorporação de escória ACIGRAN nas argamassas não apresentou influência na absorção por sucção capilar.

Quanto à absorção por imersão, as argamassas com escória ACIGRAN apresentaram melhor comportamento. A maior redução na absorção foi observado no traço 1: 1,5, chegando-se a uma redução de 62 % com 30 % de ACIGRAN em relação à argamassa de referência. Nesta propriedade, o teor que se mostrou mais adequado foi o de 30 %. Para traços de maior consumo de cimento (1: 1,5) a ACIGRAN mostrou-se bem efetiva, reduzindo drasticamente a absorção por imersão.



Da mesma forma, o índice de vazios reduz com o acréscimo de ACIGRAN, sendo a diferença mais pronunciada para o traço 1: 1,5.

Em relação à resistência ao ataque de íons cloretos não se observou, estatisticamente, alteração no comportamento das argamassas com a incorporação de ACIGRAN. Apesar de não existir diferença significativa nos valores de coeficiente de difusão com a variação do teor de ACIGRAN, verifica-se a tendência das relações água/aglomerante baixas e teores mais elevados de ACIGRAN promoverem um efeito benéfico, reduzindo o coeficiente de difusão em cerca de 56 % para o traço 1: 1,5 com 50 % de ACIGRAN.

Quanto maior o teor de ACIGRAN presente nas argamassas, maior a frente de carbonatação.

Quanto à resistência ao ataque por sulfatos, o acréscimo de ACIGRAN influencia significativamente esta propriedade. A resistência à tração na flexão de corpos-de-prova submetidos à solução de 5 % de  $\text{NaSO}_4$  aumentou como o acréscimo no teor de ACIGRAN. Este efeito é principalmente evidenciado no traço 1: 3,0 e 1: 4,5, onde verificou-se um acréscimo de 50 e 100 % na resistência, respectivamente.

Ao calcular-se o índice de resistência química das argamassas, resultante do quociente entre a resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova submersos em solução de sulfato e em solução de água com cal, o uso de ACIGRAN não influencia neste resultado. Entretanto, observa-se uma influência da interação entre o traço e o teor de ACIGRAN empregado neste índice. A incorporação de ACIGRAN foi mais efetiva para os traços 1: 3,0 e 1: 4,5, verificando-se neste último um acréscimo de 36 % no índice de resistência química ao comparar-se argamassas com substituição de 50% e a de referência.

## 9 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

O processo de granulação da escória de aciaria elétrica para uso como substituição ao cimento mostrou-se viável. Entretanto, alguns estudos para viabilidade técnica e econômica do seu uso ainda são necessários, quais sejam:

- Otimização do teor de sílica no processo de granulação;
- realização de fusões em cadinhos de grafita pura;
- determinação do tempo de moagem ótimo, em função de propriedades mecânicas e durabilidade x custos de moagem;
- estudo da influência da moagem da escória em separado ou em conjunto com clínquer;
- estudo comparativo da escória de aciaria granulada e de alto-forno;
- estudo de propriedades mecânicas, tais como resistência à compressão, à flexão, à tração na flexão e módulo de elasticidade em concretos produzidos com cimentos fabricados com clínquer e diferentes teores de ACIGRAN;
- estudo de aspectos ligados à durabilidade de concretos com a incorporação de ACIGRAN.
- verificação da influência do teor de substituição na distribuição de poros da argamassa;
- verificação da influência da cura na carbonatação de concretos com ACIGRAN;
- realização de teste piloto e em escala industrial;

Em relação a aspectos mais gerais sugere-se:

- estudar a influência do FeO na expansão da escória de aciaria;
- realizar um estudo comparativo entre os métodos de expansão analisados nesta tese e o método de ensaio a vapor;
- verificar a viabilidade do uso do processo de resfriamento brusco (granulação) para as escórias de aciaria LD.



## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J.C., CARNEIRO, F.A. Emprego de escórias siderúrgicas integradas na Engenharia Civil. Escórias Siderúrgicas: caracterização e aplicações para a Indústria da Construção Civil. In: 25º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS RESÍDUOS NA SIDERURGIA. VOLTA REDONDA, RJ. **Anais...** p.363-381, 1994
- AGRELL, S. O. Mineralogical observations on some basic open-hearth slags. **The Journal of the Iron & Steel Institute**. Vol. CLI, n.2, p. 19-55. 1945.
- AKINMUSURU, J. O. Pontencial beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes, Elsevier Science Publishers B. V. Pergamon Press plc, p. 73-80, 1991.
- ALI, NOUMAN. A., CHAN, JOSEPH S.S., PAPAGIANNAKIS, THOMAS., THERIAULT, ERIC. G., BERGAN, A. T. The use of steel slag in asphaltic concrete.. **Transportation Research Record**. 1652. p. 3 –18. 1999.
- ALVES, A. S. **Efeitos físicos e químicos de misturas pozolânicas na carbonatação e penetrabilidade à água em concretos de alto desempenho**. Santa Maria, 2000. 117 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **Standard Specification for Portland Cements**. – ASTM C 150. 1994.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **Standard test method for potencial alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method)** – ASTM C 1260. 1994.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **Standard test method for potencial expansion of aggregates from hydration reactions** – ASTM D 4792. 1995.
- ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, Vol. 23, pp. 724-742, 1993.
- ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia- Produção**. São Paulo. Ed. Arte e Ciência. Vol.1, 1997. 470p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Curso de microscopia de clínquer de cimento portland**. São Paulo. 1984. 86 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004 – **Resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10005 – **Lixiviação de resíduos**. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10006 – **Solubilidade de resíduos**. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12653 – **Materiais Pozolânicos: especificação**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5720 – **Cimento Portland de Alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5732 – **Cimento Portland Comum - Especificação**. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5735 – **Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738 – **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5753 – **Cimento Portland Pozolânico: determinação da pozolanicidade**. Rio de Janeiro, 1991.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7173 – **Blocos Vazados de Concreto Simples para Alvenaria sem Função Estrutural. Especificação.** Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7214 – **Areia normal para ensaio de cimento.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7215 – **Cimento Portland: determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7227 – **Cimento Portland: determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol.** Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9773 – **Agregados – reatividade potencial de álcalis em combinações cimento-agregado.** Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9776 – **Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapmann.** Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9778 – **Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9940 – **Agregados: Determinação do índice de manchamento em agregados leves.** Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Programa ABNT Meio Ambiente.** Ago. 1994. 6 pag.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582 – **Cimento Portland – determinação da expansibilidade de Le Chatelier.** Rio de Janeiro, 1991.

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará: estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim.** Porto Alegre, 1998. 135 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BATTAGIN, A.F. The use of microscopy for estimating the basicity of slags in slag-cements. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8., 1986, Rio de Janeiro. **Proceedings...** v.4, theme 3, p.17-21.

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas.** São Paulo, 1995. 236 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.

BENSTED, J.; VARMA, S.P. Some applications of infra-red and raman spectroscopy in cement chemistry - Part I: Examination of dicalcium silicate. **Cement Technology**, p.256-261, Jan.-Feb., 1974.

BILODEAU, A.; MALHOTRA, M. High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development. **ACI Materials Journal**, p. 41-48. Jan.-Feb. 2000.

BLUNCK, G. Utilization of blast furnace slag and steelmaking in the Federal Republic of Germany. C. R. In: CONFERENCE SOUS-PRODUITS ET DÉCHETS DANS LE GÉNIE CIVIL. Paris. 1978. p. 267-270.

BOOM, R.; MILLS, K.; RIAZ, S. Recent trends in research on slags. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAGS, FLUXES AND SALTS, 6., June 2000, Stockholm, Sweden – Helsinki, Finland. **Proceedings...**cd.

BOURDEAU (2000) The Agenda 21 on Sustainable Construction. In: CONSTRUCTION & ENVIROMENT. CIB. Nov, 2000. São Paulo. Cd.



- BREHM, F.; MORAES, C.; GRAFFITTI, D.; VILELA, A.; MAFALDO, I. Caracterização química, térmica e estrutural de pós de aciaria elétrica. In: XIII SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIFICAÇÃO. Maio, 2001. Salvador. Bahia
- BRETANHA, A. M. **Resistência à sulfatos de concretos contendo diferentes tipos de cimento e adição de CCA.** . Porto Alegre, 2000. 150 p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BRILHANTE, O. Diagnóstico do SGA e da adesão à certificação ambiental com base na ISO 14001, das primeiras indústrias potencialmente poluidoras da Baía da Guanabara (Rio de Janeiro). In: II SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL. Porto Alegre, out. 1998. p. 10-14.
- BSW - Badische Stahlwerke Aktiengesellschaft -- Relatório Anual . 1993, 1994.
- BUCHER, H. R.; RODRIGUES FILHO, H. C.; FERREIRA JUNIOR, S.; NAKAKURA, E. **Manual de Ensaio Físicos de Cimento.** São Paulo. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). 1994. 74 pag (MT-3).
- BUENFELD, N. R.; OKUNDI, E. Effect of cement content on transport in concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 50, n. 4, p. 339-351, Dec., 1998.
- BUTLER, A. Capillary absorption by concrete. **Concrete**, p. 23-25. Jul.-Aug., 1997.
- BYGDÉN, J.; DEBROY, T.; SEETHARAMAN, S. Dissolução do MgO in stagnant CaO-FeO-SiO<sub>2</sub> slags. **Ironmaking and Steelmaking**. v. 21. n. 4. p.318-323, 1994.
- CABRAL, A. E. B. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão da armadura por cloretos.** Porto Alegre, 2000. 171p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CALLEJA, J. Escorias y cementos siderúrgicos **Materiales de Construcción**, Madrid, n.186, p. 11-38, 1982.
- CAMARINI, G. Desempenho de misturas cimento portland e escória de alto-forno submetidas à cura térmica. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- CAMPOS FILHO, M. P. **Introdução à Metalurgia extrativa e Siderurgia.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. 153 p.1981.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto. Inspeção e técnicas eletroquímicas.** 237 pag. Ed. PINI: São Paulo;UFG: Goiânia.
- CATTANEO, A.; FRIGIONE, G. Performance of blast-furnace slag cement. **Cement, Concrete and Aggregates**. v. 5, n. 1, p. 42- 46. June 1983.
- CEB Durabilidad de Estructuras de Hormigón. Guia de Diseño CEB. Recomendaciones y Manuales Técnicos. Ed. GEHO –CEB. Boletín n. 12. 1996. 164p.
- CERJAN-STEFANOVIC, S.; RASTOVCAN-MIOC, A.; NOVOSEL-RADOVIC, VJ. Mechanical properties of cement with addition of electrical furnace slag. **Metalurgija**. V36, part 2, 1997. P. 93-98.
- CERJAN-STEFANOVIC, S.; RASTOVCAN-MIOC; NOVOSEL-RADOVIC, VJ. **Metalurgija**, v.36, part 2, p. 93-98, 1997.
- CEUKELAIRE, L.; NIEUWENBURG, D. Van Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 23, p. 442-452. 1993.
- CHEHEBE, J. R. et al. Geração e destinação de escórias pela indústria siderúrgica brasileira. Escola Técnica Federal do Espírito Santo. 1986.
- CHERON, M, LARDINOIS, C. The role of magnesia and alumina in the hydraulic properties of granulated blast-furnace slags. In: 5<sup>TH</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE



CHEMISTRY OF CEMENT. Tokyo. October, 1968. **Proceedings..** Published December, 1969. Part IV- 121, v.4, 4V.

CINCOTTO, M.A.; BATTAGIN, A. F.; AGOPYAN, V. **Caracterização da escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado.** São Paulo. IPT, 1992. 33p. ( Boletim 65).

COALE, R. D. et al. Cementitious Properties of metallurgical slags. **Cement and Concrete Research.** Vol 3. Pergamon Press Ltd. USA. p. 81-92. 1973.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL – CSN I Encontro de aplicação de produtos Siderúrgicos em Obras Municipais . 1988. Volta Redonda.

CONTIJO, P. R.A. A utilização dos rejeitos minerários e industriais em pavimentação rodoviária. Ministério dos Transportes – DNER. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Div. De Pesquisas. 17 p. 1989.

COOMARASAMY, T.; WALZAK, T. Effects of moisture on surface chemistry of steel slags and steel slag-asphalt paving mixes. **Transportation Research Board.** n. 1492. Washington. p. 85-95. 1995.

CRUZ, E. B.; UKAI, E. H. A.; BENEDUCE NETO, F.; TOSETTI, J. P. ; FERREIRA NETO, J. B. F. Tratamento pirometalúrgico de escórias de aciaria a oxigênio destinadas à construção civil e fluxos de refino. In: XXXI SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS DA ABM, maio 2000. p. 527-540.

DAIDO STEEL Aproveitamento da escória de Forno elétrico. Material apresentado no 39 simpósio do grupo de Forno elétrico.. Comitê de Pesquisa Cooperada da Japan and Steel Association. Maio, 1993. 13 pag.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssilica.** São Paulo, SP. 1995, 286p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

DAUBE, J. Etude de la valorisation de Scories d'Aciérie L.D. **Silicates Industriels**, n.2, p.55-59, 1982.

De CEUKELAIRE, L. , Van NIEUWENBURG, D. Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete. **Cement and Concrete Research.** Pergamon Press Ltd. USA. v 23, p. 442-452, 1993.

DELIMI, R.; GHORAB, M. F.; CHTCHERBAKOV, V.; MESSADI, D. Physico-Chemical Studies of the CaO-Ethylene Glycol System. Determination of free lime in industrial products. **Journal f. prakt. Chemie.** Band 333, v. 4, 1991, p. 593-600.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Escórias Siderúrgicas: Material de múltiplas aplicações. Divisão de Pesquisas. 1988. 49 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER – EM 262/94 **Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários.** 1994.

DHIR, R. K. et al. Preconditioning in situ concrete for permeation testing. Part 1: Initial surface absorption. **Magazine of Concrete Research**, v. 45, n. 163, p. 113-118. 1993.

DHIR, R. K., BYARS, A. PFA concrete: chloride diffusion rates. **Magazine of Concrete Research**, v. 45, n° 162, p. 1-9. mar 1993.

DONGXUE, L.; XINHUA, F.; XUEQUAN, W.; MINGSHU, T. Durability Study of Steel Slag Cement, v. 27, n° 7, p. 983-987, 1997.

DOUGLAS, E. Blast-furnace slag cement mortar and concrete: Durability aspects. . Supplementary Cementing Materials for Concrete. Ed. V. M. Malhotra. CANMET. Chapter 1. p. 337-428. Ottawa. 1987 (SP 86-8E).



DUDA, A. Aspects of the sulfate resistance of steelwork slags cements. **Cement and Concrete Research**. v. 17, p. 373-384. 1987.

DZIARMAGOWSKI, M.; KARBOWNICZEK, M.; PYZALSKI, M.; OKÓN, J. Reduction of converter slag in electric arc furnace. **Ironmaking and Steelmaking**, v.19, n.1, p.45-49, 1992.

ELLIS Jr., W. E. Point of view for durable concrete, fly ash does not "replace" cement. July, **Concrete International**. 1992. p. 47- 51.

ELLIS, W. E.; RIGGS, E. H.; BUTLER, W. B. Comparative results of utilization of fly ash, silica fume and GGBFS in reducing the chloride permeability of concrete. In: **SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE**. 1991. Montreal. Canadá. Detroit: American Concrete Institute. P. 335-354 (ACI Special Publication, 126).

EMERY, J. J. Steel slag applications in highway construction. **Silicates Industriels**. 4-5. 1977. P.209-218.

EMERY, J.J.; HOOTON, R.D. Ground pelletized slag autoclaved blocks. In: **COLLOQUE INTERNATIONAL SUR L'UTILISATION DES SOUS-PRODUITS ET DÉCHETS DANS LE GÉNIE CIVIL**, 1978, Paris. **Proceedings...** Association Amicale des Ingenieurs Anciens Eleves de L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussees: Laboratoire Central des Ponts et Chaussees. v.2. p.303-307. 1977.

**EPA RCRA Solid Waste Programs**. October 1999, 29p (EPA530-R-00-005). Disponível na internet <http://www.epa.gov>

**EUROPEAN STANDARDS. Standard tests for chemical properties of aggregates- Part 1: Chemical Analysis** – BS EN 1744-1: 1998.

FARRAND, B.; EMERY, J. Recent improvements in quality of steel slag aggregate, pág. 137-141. **Transportation Research Record**. n. 1486.

FARRAND, B.L., EMERY, J.J. Recent improvements in the quality of steel slag aggregate. **Proceedings..** In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RESOURCE CONSERVATION AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES**. p. 99 – 106. 1994.

FEATHERSTONE, W. B. Slag treatment improvement by dry granulation. **Iron and Steel Engineer**. July, 1998. Pag. 42-46.

FERREIRA, A. A. **Concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz: avaliação de propriedades relacionadas com durabilidade**. Porto Alegre, 1999. 154 p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, PINI, 1994. 573 p.

FROHBURG, M. G. **Thermodynamik für Metallurgen und Werkstofftechniker**. Leipzig. Ed. Veb Deutscher Verlag Für Grundstoffindustrie, 1980. 191p.

GARCIA, C., SAN JOSÉ, J. T., URRETA, J. I. Reuse and valorization in civil works of electric arc furnace (EAF) slag produced in C.A.P.V. In: **GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY**. REWAS, 1999, Ed. By I. Gaballatt, J. Hager, R. Solozabal. San Sebastián, SPAIN. p. 417-424 .Sept. 1999.

GEISELER, J.; SCHLOSSER, R. Investigations concerning structure and properties of steel slags. **Proceedings..** In: **3<sup>rd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAG AND FLUXES**. Glasgow. 1998. p. 40-42.

GEORGE, C.M.; SORRENTINO, F.P. New concrete based on oxygen steel slag containing alumina. **Silicates Industriels**, n.3, p.77-83, 1982.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Porto Alegre, RS. 2001, 170p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-



Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GJORV, O. Important test methods for evaluation of reinforced concrete durability. In: V. M. MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT AND FUTURE, 1993, Berkeley, Califórnia. Detroit: American Concrete Institute, 1994. P. 545-576 (ACI Special Publication, 144).

GLASSER, F. P. Materials Science of Concrete II chapter in Chemical, mineralogical, and microstructural changes occurring in hydrated slag-cement blends. *Materials Science of Concrete II*. p 41- 81. 1990.

GOLDRING, D. C.; JUCKES, L. M. Petrology and stability of steel slags. *Ironmaking and Steelmaking*. v. 24 no 6. p. 447-456. 1997.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Porto Alegre, 2000. 113 pag. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GOPALAN, M. K. Sorptivity of fly ash concretes. *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 8, 1996, p. 1189-1197.

GUMIERE, A. G. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD em Materiais de Construção Civil**. Proposta de Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2000. 101 p.

GUPTA, J. D., KNELLER, W. A., TAMIRISA, R., SKRZYPCZAK-JANKUN, E. Characterization of Base and Subbase Iron and steel Slag Aggregates Causing Deposition of Calcareous Tufa in Drains. *Transportation Research Record*. n. 1434. p. 8-16. 1994.

GUPTA, J. D.; DOLLIMORE, D.; ADAMS, J. Reduction, elimination or encapsulation of free and hydrated limes in steel slags used as subaggregates. Research proposal submitted to the American Iron and Steel Institute. May, 1995.

GUPTE, K.A., RAU, R. H. G. Use of oxidising slag from basic arc Furnace for cement concrete production. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. v. 40, part 5. 1987. p. 431-433.

GUTT, W. Aggregates from waste materials. *Chemistry and Industry*, p. 439-447, 3 jun. 1972.

HÄKKINEN, T. The microstructure of high strength blast furnace slag concrete. *Nordic Concrete Research*. The Nordic Concrete Research. p. 67- 82. Jan. 1992.

HALL, C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review. *Magazine of Concrete Research*, v. 41, n. 147, p. 51-61, june, 1989.

HELALI, K.; KAZMIEROWSKI, T. J.; BRADBURY, A.; KARAN, M. A. Application of network – Level pavement management system technology to a unique pavement deterioration problem. *Transportation Research Record*. n. 1524. p. 67-75. 1996.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. 231 p. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HELMUTH, R.; WEST, P. B. Reappraisal of the autoclave expansion test. *Cement, Concrete, and Aggregates*, CCAGDP, v. 20, n 1, p. 194-219. June 1998.

HILTUNEN, A. The influence of chemical and physical properties on the utilization of slags. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAGS, FLUXES AND SALTS, 6., June 2000, Stockholm, Sweden – Helsinki, Finland. *Proceedings...*cd.

HISADA, M. et al. Evaluation of mineral admixtures on the viewpoint of chloride ion migration through mortar. *Cement and Concrete Composites*. Elsevier. v 21, p. 443-448, 1999.



- HO, D. W. S. et al. Influence of slag cement on the water sorptivity of concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 2., 1986, Madri, Spain. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1986. V. 2, p. 1463-1473 (ACI Special Publication, 91).
- HOOTON, R. D. Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity. **ACI Materials Journal**, p. 143-151. mar.-apr. 1993.
- HOOTON, R. D. The reactivity and hydration products of blast-furnace slag. . Supplementary Cementing Materials for Concrete. Chapter 4. p. 247-288. Ed. V. M. Malhotra. CANMET. Ottawa. 1987 (SP 86-8E).
- HORIGUCHI, K. et al. The rate of carbonation in concrete made with blended cement. Concrete Durability. p. 917-929. SP 145-49. 1994
- HORNAIN, H. Diffusion of Chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**. v. 25. n. 8, Elsevier Science Ltd. p. 1667-1678. 1995.
- HURD, J. O. Effect of recycled subbase aggregates on pipe undergrains. **TR News – Transportation Research Board National Research Council**. n.184. p. 26. May-June, 1996.
- IDEMITSU, T., TAKAYAMA, S., WATANABE, A. Utilization of Converter Slag as a Constituent of Slag Cement. v. 3.,33-38 p. 1981.
- INOUE, R.; SUIITO, H. Hydration of crystallized lime in BOF slags. **ISIJ International**, v. 35, n 3, p. 272-279. 1995.
- INSLEY, H., FRÉCHETTE, V. D. **Ceramics and cements**. Academic press inc., publishers, New York, N.Y., , p. 1257. 1955
- INSTITUTO ARGENTINO DE SIDERURGIA – IAS Escórias Siderúrgicas. 1987. Buenos Aires. 8 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS Anuário Estatístico da Indústria Siderúrgica Brasileira. 2000. Rio de Janeiro.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS Material obtido no curso sobre gestão de resíduos, realizado no Japão em outubro de 1995. (AOTS – JISF/IBS). In: FÓRUM DE MEIO AMBIENTE – IBS. 1995. Rio de Janeiro.
- INSTITUTO LATINOAMERICANO DEL FIERRO Y EL ACERO – ILAFA. **Reciclaje de escorias de aciaria**. Manual II. 1995. 73 p.
- INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE **The management of steel plant ferruginous by-products**. Committee on Technology. Brussels, 1994.
- IRASSAR, E. F. Sulfate resistance of blended cement: prediction and relation with flexural strength. **Cement and Concrete Research**. v. 20, n. 4, Elsevier Science Ltd, p. 209-218, 1990.
- ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão de armadura**. São Paulo, 1995. 280 pag. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- JACOMINO, V. M. F., BATISTA, A. A. M.; RIBEIRO, E. D. L.; CASTRO, L. F. A.; LOPES, L. E. F. Usos da escória de alto-forno – Alternativas para a melhoria da qualidade ambiental. In: XXI SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO . ABM. Santos – SP. **Anais**. p 97-107. Nov-Dez. 2000.
- JEFFES, J.H.E. The thermodynamics of polymeric melts and slags. **Silicates Industriels**, n.12, p.325-332, 1975.



JIS A 5015 – 1992 Escória Siderúrgica para Construção de Estradas.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 112 p. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 1995

JOHN, V. M. Utilização de Resíduos Agro-Industriais para uso na Construção Civil no Brasil. In: **RECICLAGEM DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONÔMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL**. **Anais**. São Paulo. p.67-76. Abril 1997.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 102 p. São Paulo, 2000. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo.

JOHN, V. Pesquisa e desenvolvimento de mercados para resíduos. In: **WORKSHOP "RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL"**. **Anais**. São Paulo. ANTAC.1996. p. 21-30

JUCKES, L. M. Test Methods for the assement of the volumetric stability of steel slags. **British Steel Technical**. 12 pag. 1991.

KAMON, M.; NONTANANANDH,S.; KATSUMI, T. Utilization of stainless-steel slag by cement hardening. **Soil and Foundations**, v. 33, n. 3, 118-129, Sept. 1993.

KANDHAL, P. S.; HOFFMAN, G. Evaluation of steel slag fine aggregate in ht-mix asphalt mixtures. **Transportation Research Record**. n. 1583. p. 28-36.1997.

KAWAMURA, M.; TORII, K.; HASABA, N.; NICHIO, N.; ODA,K. Applicability of basic oxygen furnace slag as a concrete aggregate. In: **FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND OTHER MINERAL BY-PRODUCTS IN CONCRETE, Proceedings...** v.2, p.1123-1141. (SP-79). 1983.

KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para a análise de eficiência de películas aplicadas sobre as estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação**. São Paulo, 1995. 168 pag. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

KELHAM, S. A. Water absortion test for concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 10. Jun/ 1988, p. 106-110.

KHAN, M. I.; WAHHAB, H. I. A. **Construction and Building Materials**. 12. p. 195-201. 1998.

KIRSCH, H. **Mineralogia aplicada para engenheiros, tecnólogos e estudantes**. Editora Polígono – Ed. USP, São Paulo, 1972, p.180-193.

KNELLER, W. A.; GUPTA, J.; BORKOWSKI, M. L.; DOLLMORE, D. Determination of original free lime content of weathered iron and steel slags by thermogravimetric analysis. **Transportation Research Record**. n. 1434. p.17-22. 1994.

KOCH,A.; STEINEGGER, H. **A rapid method for testing the resistance of cements to sulphate attack**. Wiesbaden, v.13, n.7, p.317-324. Jul, 1960.

KORTBAOUI, A.; TAGNIT-HAMOU, A.; AITCIN, P. C. The use of Stainless steel slag in concrete. **Ceramic Transactions. Cement- Based Materials: Present, future, and environmental aspects**. V. 37. 1993. P.77-90.

KRUGER,P. Panorama mundial do aproveitamento de resíduos na siderurgia. **Metalurgia e Materiais**. Fev. 1995

LAI, G.-C.; NOJIRI, T.; NAKANO, K. Studies of the stability of  $\beta$ -Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> doped by minor ions. **Cement and Concrete Research**, v. 22, . p 743-754, 1992.

LAWRENCE, C. D. Sulphate attack on concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 42, n. 153, p. 249-264, Dec. 1991.



- LEA, F. M. **The Chemistry of Cement and Concrete**. 3 ed. London, Edward Arnold (Publishers) Ltda, 1970. 727 p.
- LEE, A R. **Blast Furnace and steel slags production, properties and uses**. Edward Arnold Ltda, London – England, 1974, 119 p, p. 1-97.
- LEVERT, J.M.; RIQUIER, Y.; GOHY, C. Utilisation des Scories LD dans la fabrication du ciment Portland. **Silicates Industriels**. p.9-12. 1982.
- LIDE, D. R. **Handbook of Chemistry and Physics**. 80 nd. Edition. 1999-2000.
- LIMA, L. A. **Hormigones com escorias de forno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental**. Tesis (Doctoral). 243 p. Barcelona. 1999. Universitat Politècnica de Catalunya – Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals i Ports.
- LITTLE, A. D. Survey of the Slag Industry in Seven Countries. Draft Report to Brazilian Institute of Steel. April, 1999. 112p.
- LITVAN, G. G. Carbonation of granulated blast furnace slag cement concrete during twenty of field exposure. **Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozolans in Concrete**. Detroit: ACI, 1986. v. 2. P. 1445-1462 (SP-91).
- LIU, Z.; TANG, M.; CUI, X. Expansion of cement containing crystalline magnesite with and without fly ash and slag. **Cement, Concrete, and Aggregates**, CCAGDP, v. 20, n. 1, p. 180-185. June 1998.
- LÓPEZ, F.A., FORMOSO, A., MEDINA, F. Escorias LD. Coprodutos de la industria siderúrgica. Parte I. Composición, tratamiento y aplicaciones. **Ver. Metal**. Madrid. 25 (4). p. 247- 254. 1989.
- LOUZADA, D. M. **Contribuição ao estudo do emprego das escórias siderúrgicas na fabricação de blocos pré-moldados**. 85 p. Rio de Janeiro. 1991. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense. Centro Tecnológico. Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- LÚCIO, A. **Físico Química Metalúrgica**. Universidade Federal de Minas Gerais. 1981. Vol.II. 324 pag.
- LUXÁN, M. P.; SOTOLONGO, R.; DORREGO, F.; HERRERO, E. Characteristics of the slag produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace. **Cement and Concrete Research** 30 . p. 517-519. 2000.
- MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaios para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. 135 p. São Paulo, 1995. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 2000.
- MALHOTRA, V.M.; CARETTE, G.G.; SVASUNDARAM, V. Role of silica fume in concrete: a review. In: **ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY**, Athens, 1992. **Proceedings..** Montreal: CANMET, 1992. p.925-991.
- MANCIO, M. **Caracterização e avaliação das escórias de aciaria elétrica**. Porto Alegre, 2001. Dissertação a ser defendida (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MASSAZZA, F.; COSTA, U.; MARCHESE, B. Capillary absorption and composition of pastes and mortars made with Portland and Pozzolan cements. **Durability of Building Materials and Components** , 6. E & FN Spon, 1993. P.193-202.
- MASUERO, A. B., DAL MOLIN, D. C. C., VILELA, A. C. 2000b Expansion stabilizing of electric steel slag aiming its use as civil construction material. In: **CONSTRUCTION & ENVIRONMENT**. CIB. Nov, 2000b. São Paulo. Cd.



- MASUERO, A. B., DAL MOLIN, D. C. C., VILELA, A. C. Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos. In: RESÍDUOS INDUSTRIAIS. SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM. Cd. São Paulo – SP. 10 p. cd. 2000a.
- MEHTA, P. K.; GJORV, O. E. **A new test for sulfate resistance**. Journal of Testing and Evaluation, v.2, n.6, p.510-514. Nov. 1974.
- MEADOWCROFT, T. R.; IONESCU, D.; BARR, P. V.; MURPHY, J. N. Physical chemistry of some slag and glass systems useful in recycling. **Materials Transactions, JIM**, vol.37, n. 3 (1996), pp. 532- 539.
- MEHTA, P. K. Natural pozzolans. Supplementary Cementing Materials for Concrete. Chapter 1. Pp. 3-33. Ed. V. M. Malhotra. CANMET. Ottawa. 1987 (SP 86-8E).
- MEHTA, P. K. Conferência no HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES. (1999a).
- MEHTA, P. K. Conferência no HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES. Gramado. 1999.
- MEHTA, P. K.; MALHOTRA, V. M. Pozzolanic and cementitious materials. **Advances in Concrete Technology**, v. 1. CANMET, Ottawa, 1996.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, PINI, 1994. 573 p.
- MILLS, K.C. **Slags Atlas**. 2<sup>nd</sup>. Edition. Edited by Verein Deutscher Eisenhüttenteute. Verlag Stahleisen GmbH, Germany, 1995.
- MÔNACO, A.; WU, W-K. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RESOURCE CONSERVATION and ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES IN METALLURGICAL INDUSTRIES, The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 1994. **Proceedings...**, p. 107-116.
- MONSHI, A., ASGARANI, M. K. Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone. **Cement and Concrete Research**, v.29, p. 1373-1377, 1999.
- MONTGOMERY, D. G., WANG, G. Instant – Chilled Steel Slag Aggregate in Concrete – Fracture Related Properties. v. 22, p. 755-760, 1992.
- MONTGOMERY, D. G., WANG, G. Instant-Chilled Steel Slag Aggregate in Concrete – Strength Related Properties. v. 21, p. 1083-1091, 1991.
- MONTGOMERY, D. G.; WANG, G. Preliminary Laboratory Study of Steel Slag for Blended Cement Manufacture. **Materials Forum**. p. 374-382., 1991.
- MOORE, C.; MARSHAL, R. **Steelmaking**. The Institute of Metals. 1991. 172p.
- MORINO, K., IWATSUKI, E. In: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLIN WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY. REWAS, 1999, Ed. By I. Gaballatt, J. Hager, R. Solozabal. San Sebastián, SPAIN. p.521-530. Sept. 1999.
- MOTZ, H., GEISELER, J. Products of steel slags na opportunity to save resources. **Waste Management**, 21. p. 285-293. 2001.
- MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. Porto Alegre, 2000. 192 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MOURA, W., MASUERO, A. B., DAL MOLIN, D. C. C., VILELA, A. C. Concrete Performance with admixtures of electrical steel slag and copper slag concerning mechanical properties. In: HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES. **Proceedings..** Second CANMET/ACI International Conference. American Concrete Institute. Gramado, Brazil. CANMET/ ACI, 1999. (SP 186).



MURPHY, J.N.; MEADOWCROFT; BARR, P.V. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag. **Canadian Metallurgical Quarterly**. v. 36. n. 5. p. 315-331. 1997.

N242 E Revised proposal of draft European Standard for Aggregates for Bituminous Mixtures and Surface Dressings for Roads, Airfields and other Trafficked Areas. aug. 1995.

NAGATAKI, S. Mineral admixtures in concrete: state of the art and trends. In: V. MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM – CONCRETE TECHNOLOGY PAST, PRESENT, AND FUTURE, 1994. Berkeley. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1994, p. 447-483 (SP-144). Editor MEHTA, P. K.

NATIONAL SLAG ASSOCIATION. Folder. Sd.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2 ed. São Paulo, Pini, 1997. 828 p.

NGALA, V. T. et al. Diffusion in cementitious materials: II further investigations of chloride and oxygen diffusion in well-cured OPC and OPC/ 30% PFA pastes. **Cement and Concrete Research**. Vol. 25, n. 4, Elsevier Science Ltd, pp. 819-826, 1995.

NUNES, E. Programas de educação ambiental para capacitação de recursos humanos em serviço nas organizações que visam emissão zero. In: II SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL. Porto Alegre, out. 1998. p. 580-584

OKUMURA, H. Recycling of iron and steelmaking in Japan. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROCESSING MATERIAL FOR PROPERTIES – Warrendale. PA. p. 803-806, 1993.

ORMSBY, W.C. Use of waste materials and by-products in road construction: report of °E.C.D. Research Committee C 12. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF BY-PRODUCTS AND WASTE IN CIVIL ENGINEERING. Association Amicale des Ingenieurs anciens élèves. v. I. Nov. 1978. p.29-35.

OSBORNE, G. J. Carbonation of blastfurnace slag cement concretes. **Durability of Building Materials**, 4. Amsterdam. Elsevier Science Publishers B. V., p. 81-96. 1986.

OZEKI, S. Properties and usage of steel plant slag. In: ENCOSTEEL – STEEL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Stockholm, Sweden. June, 1997. 135-140 p.

PAGE, C. L. et al. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**. Pergamon Press Ltd. USA. v. 11, p. 395-406, 1981.

PARROTT, L. J. A review of carbonation in reinforced concrete. Cement and Concrete Association. 42p.

PENNSYLVANIA TESTING METHOD – PTM 130. Método de ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria. Maio de 1978. Adaptado pelo Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais – Gerais – 1/ DER – MGG – 1982.

PEREIRA, E.A.C. Aspectos técnicos de gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque. In: 25º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO, MATÉRIAS-PRIMAS E RESÍDUOS NA SIDERURGIA. Volta Redonda, RJ. **Anais..** p. 187-199. 1994.

PEREIRA, V.. Porto Alegre, 2001. 150p Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PHILIPPOSE, K. E. et al. Durability predictions from rate of diffusion testing of normal portland cement, Fly Ash, and Slag Concrete. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE. 1991. Montreal. Canadá. Detroit: American Concrete Institute. p. 335-354 (ACI Special Publication, 126).

PIASTA, W.G.; HEBDA, L. Sulphate expansion and permeability of concrete with limestone aggregate. **Magazine of Concrete Research**, v. 43, n. 155, p. 81-85, June, 1991.

PIRET, J.; DRALANTS, A. Utilisation of LD Slag by Reduction in the Liquid State Production of Portland Clinker and Hot Metal. **ASM International - Materials Information**



**Translations Service.** Series BISITS Ferrous Metallurgy. BISI 28554, n 784, (3), 3 – 7. 1984.

RAIT, J.; GOLDSCHMIDT, H. J. A study of the reactions between dolomite and various minerals. Part II – X-ray Examination of the Dolomite-B/Steatite-A Series. **Second Report on Refractory Materials, Iron and Steel Institute.** Special report n. 28, p. 49-61, 1942.

RASHEEDUZZAFAR et al. Influence of cement composition on the corrosion of reinforcement and sulfate resistance of concrete. **ACI Materials Journal**, p. 114-122. Mar.-april. 1990.

REEVES, B. J.; LU, W-K. High Temperature Modification of Steelmaking Slag by Addition of Fayalite Slag to Create a Volumetrically Stable Aggregate. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAGS, FLUXES AND SALTS, 6., June 2000, Stockholm, Sweden – Helsinki, Finland. **Proceedings...**cd.

RIBEIRO, J. L. D. **Projeto de experimentos na otimização de produtos e processos.** Porto Alegre, PPGE/UFRGS, 2000. Notas de aula.

ROSA, M. **Caracterização da incorporação de escória de aço inoxidável em materiais cerâmicos quanto à imobilizante do cromo.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.

ROSTIK, L. F. EAF Steel Company and the By-product synergy Environment. In: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY. REWAS, 1999, Ed. By I. Gaballatt, J. Hager, R. Solozabal. San Sebastián, SPAIN. v. II. Sept. 1999. p. 1593-1603.

RUN-ZHANG, Y.; SHI-XI, O.; QIONG-YING, G. Structure and hydraulic activity of slags in the system CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. **Silicates Industriels**, n.1, p.3-6, 1983.

SANO, N.; LU, W.; RIBOUD, P. **Advanced Physical Chemistry for Process Metallurgy.** Academic Press. 1997. 429 p.

SASAKI, M.; FUKUARA, H.; ENOKIDO, K. Method of identifying minerals in blast furnace and BOF slags by optical microscope. **Nippon Steel Technical Report**, n. 17, p. 1-8, 1981.

SATO, K.; KONISHI, E.; FUKAYA, K. Properties of very fine blast furnace slag prepared by classification. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8., 1986, Rio de Janeiro. **Proceedings...** v.4, theme 3, p.239-244.

SCHNEIDER, U.; PIASTA, W. G. The behavior of concrete under Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution attack and sustained compression or bending. **Magazine of Concrete Research**, v. 43, n. 157, p. 281-289, dec., 1991.

SEEHRA, S.; KUMAR, S.; TIKE, G. Some aspects of durability assurance in construction practice. **Durability Materials and Components**. 1993. 8 p.

SEIDLER, N. **Efeito de adições pozolânicas na alcalinidade e consumo de hidróxido de cálcio durante a hidratação e carbonatação de materiais cimentícios.** Porto Alegre, 1999. 139 p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SERSALE, R. Aspects of the chemistry of additions. In: **Advances in Cement Technology**. P. 537- 567. Ed. GHOSH, S. H. . Pergamon Press. India. 1983.

SERSALE, R. et al. Characterization and Potential uses of steel slag. **Silicates Industriels**, p.163-170, 1986.

SHARARA, A. M.; EL-DIDAMONY, H.; EBIED, E.; EL-ALEEM, A. Hydration characteristics of  $\beta$ -C<sub>2</sub>S in the presence of some pozzolanic materials. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 5. p 966-974, 1994.



SHARARA, A.; DIDAMONY, H.; EBIEB, E.; EI-ALEEM, A. Hydration characteristics of  $\beta$ -C2S in the presence of some pozzolanic materials. **Cement and Concrete Research**. v.24, n5, p.966-974. 1994.

SHI, C.; QIAN, J. High performance cementing materials from industrial slags - a review. **Resources, Conservation & Recycling**. v. 29. p.195-207. 2000.

SHOUSUN, L. Effect of MgO in steel slag on soundness of cement. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 7., 1980, **Proceedings...** Published 1980. VII, p.25-30.

SILVA FILHO, A. F. **Contribuição ao estudo do desempenho de concreto produzido com agregado graúdo de escória de ferro-cromo**. Porto Alegre, 2001. 130 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica**. Porto Alegre, 1994. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SILVA, M. G.; SILVA, V. G.; OLIVEIRA, C. T. A.; JOHN, V.; AGOPYAN, V. Reciclagem das escórias siderúrgicas: importância da parceria tecnológica. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS. **Anais**. Vitória, Espírito Santo, 1997. p. 29-43.

SILVA, S.; JUSTUS, S.; ANDRADE, R.; LONGO, E.; CUNHA, F.; BRITO, H.; BALDUINO, F. Aplicação de escória LD como pavimento rodoviário e lastro ferroviário. In: XXXI SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO. ABM, Santos, São Paulo. Nov. 2000. P.43-55.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos**. Porto Alegre, 1996. 139 p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SLAG. NATIONAL SLAG ASSOCIATION. The Construction Material of Choice. sd.

SOLOMON, C. **Slag – Iron and Steel**. 1993. P. 1053-1067.

SOUZA, L. G. Métodos de penetração de água no concreto. Rio de Janeiro, RJ. 2001. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense.

SRINIVAS, Y. M.; GUPTA, K. A.; RAU, R. H. G. Use of Oxidising Slag from Basic Arc Furnace for Cement Concrete Production. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v. 40, n. 5, p. 431-433, oct., 1987.

STEEL SLAG TECHNICAL COMMITTEE. Quality Control Guide for Steel Slag Aggregates for Use in Hot-Mix Asphalt. Ontario Ministry of Transportation Pavement Advisory Committee. 1996b. 15 p.

STEEL SLAG TECHNICAL COMMITTEE. Steel slag aggregates for hot-mix asphalt concrete. Summary of work to date and current status. Ontario Ministry of Transportation Pavement Advisory Committee. 1996. 34 p.

SUN, S.; JIANHUA, W.; GUILIN, Z.; YONGJUN, L. Steel Slag Cement. In: MACMASTER SYMPOSIUM PRETREATMENT AND RECLAMATION OF DUST, SLUDGES AND SCALES IN STEEL PLANTS. Mc Master University. Hamilton, Canadá. P.253-261.

SUN, S.; JIANHUA, W.; GUILIN, Z.; YONGJUN, L. Steel slag cement. In: MACMASTER SYMPOSIUM PRETREATMENT AND RECLAMATION OF DUST, SLUDGES SCALES IN STEEL PLANTS. Hamilton, Canadá, 1993, p. 253-260.



- TAKEMOTO, K.; UCHIKAWA, H. Hydration of pozzolanic cements In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 7., 1980, **Proceedings...** Published 1980.
- TALERO, R. et al. La resistencia a los sulfatos de los cementos portland y su grado de finura de molido: análisis de su relación. **Materiales de Construcción**, v. 44, n. 234, p. 5-11, Abr/May/Jun, 1994.
- TARDY, P. Situation and tasks of waste in the Hungarian steel industry. In: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY. REWAS, 1999, Ed. By I. Gaballatt, J. Hager, R. Solozabal. San Sebastián, SPAIN. Sept. 1999.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London: Thomas Telford, 1997. 458 p.
- TEIXEIRA, E. N. Resíduos sólidos: minimização e reaproveitamento energético. In: RESÍDUOS INDUSTRIAIS. SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM. Cd. São Paulo – SP. 10 p. cd.
- THOMAS, G. Slags. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF BY-PRODUCTS AND WASTE IN CIVIL ENGINEERING. Association Amicale des Ingenieurs anciens élèves. v. III. Nov. 1978. p. 71-79.
- TORII et al. Carbonation and steel corrosion in concretes containing mineral admixtures under different environments. In: INTERNATIONAL CONFERENCE HELD AT THE UNIVERSITY OF SHEFFIELD, Sheffield, 1994. **Proceedings**. p 24-28, 1994.
- TREFFNER, W. S. Petrographic studies of Basic Oxygen Furnace Slags and Use Refractories. **Ceramic Bulletin**. Vol. 44, n. 7, 1965.
- TÜFEKÇİ, M.; DEMIRBAS, A.; GENÇ, H. Evaluation of steel furnace slags as cement additives. **Cement and Concrete**, v. 27. n. 11, pp. 1713-1717. 1997.
- TUMIDAJSKI, P. J. et al. Na effective diffusivity for sulfate transport into concrete. Pp.
- UCHIKAWA, H. Effect of blending components on hydration and structure formation. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE QUÍMICA DO CIMENTO, 8. 1986, Rio de Janeiro. Anais. [São Paulo: ABCP], v. I, p. 248-80, 1986.
- UKE, K.; GRUTZECK The use of stainless steel slag in concrete. **Ceramic Transactions**. Cement-based materials: present, future and environmental aspects. v. 37. p. 77-90.
- VASQUEZ, E. Utilización de residuos en la C.E.E.: Aspectos políticos y ambientales,. Estado del arte y normalización. In: RECICLAGEM DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONÔMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL. **Anais**. Abril 1997. São Paulo. p.64-66.
- VIKLUND-WHITE, C., YE, G. Utilization and treatment of steelmaking slags. In: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY. REWAS, 1999, Ed. By I. Gaballatt, J. Hager, R. Solozabal. San Sebastián, SPAIN. p.337-345. Sept. 1999.
- VILELA, A. C. F.; BERNARDES, A. M. ; ROSA, M.; MAFALDO, I. Caracterização da escória gerada na produção do aço inoxidável. In: II SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL. GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS E CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL p. 246-251. Out. 1998. Porto Alegre, RS.
- WEAST, R.C. **Handbook of Chemistry and Physics**. 52 nd. Edition. 1971-1972.
- XUEQUAN, W.; HONG, Z.; XINGAI, H.; HUSEN, L. Study on steel slag and fly ash composite Portland cement. **Cement and Concrete Research**. 29. 1999. P. 1103-1106.
- YANG, J.C. Chemistry of slag-rich cements - Supplementary paper IV-128. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5., 1968, Tokio. **Proceedings...** Published December 31, 1969. 4v. v.4, part IV, p. 296-309.



YUJI, W. The effect of hydration products in steam treated steel slag (°C.S) on the hydration of steel slag-portland blended cement. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8., 1986, Rio de Janeiro. **Proceedings...** v.4, theme 3, p. 36-40.

YU-JI, W.; DA-LI, L. The steel slag blended cement. **Silicates Industriels**. n. 6. 1983. p.121-126.

YU-LI, W, e GONG-XIN, X. Research on the main mineral phase and its cementitious properties of oxygen converter slag. **Proceedings**. In: 7<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT. v. 3. Paris. 19-24. 1980.

ZETTERMANN, L. F.; MORAES, C.A.M.; KEMPKA, A.; VILELA, A. C.F. Caracterização da Escória de Aço Inoxidável com Vistas a Seu Reaproveitamento no Processo de Fabricação do Aço. 12° Seminário de Aceria, realizado de 02 a 05 de novembro de 1999, Buenos Aires, Argentina, pp. 719-728.

ZONGJIN, L. et al. Investigation of chloride diffusion for high-performance concrete containing fly ash, microsilica and chemical admixtures. **Aci Materials Journal**. May-June 1999. 391-396.

## **ANEXOS**



**Anexo 1:** Avaliação das modificações químicas, físicas, mineralógicas e microestruturais das escórias de aciaria elétrica ao longo do tempo

## ANEXO 1

### AVALIAÇÃO DAS MODIFICAÇÕES QUÍMICAS, FÍSICAS, MINERALÓGICAS E MICROESTRUTURAIS DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA ELÉTRICA AO LONGO DO TEMPO

Objetivando buscar subsídios para o entendimento do fenômeno de expansão das escórias, foi realizada uma avaliação, em caráter exploratório, da escória ao longo do tempo, procurando identificar a existência de possíveis compostos expansivos e a sua alteração, em massa, ao longo do tempo quando submetidas a diferentes exposições.

#### A1.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, estabeleceu-se que as análises seriam realizadas para escórias com três diâmetros máximos distintos, para tentar modelar o comportamento do material em função da sua dimensão. A definição dos mesmos foi feita com base na distribuição granulométrica (NBR 7217/1987) realizada em uma amostra de material coletado. Elegeu-se 3 faixas granulométricas:  $2,36 \text{ mm} \leq \phi < 4,8 \text{ mm}$ ,  $12,5 \text{ mm} \leq \phi < 19,1 \text{ mm}$  e  $19,1 \text{ mm} \leq \phi < 25 \text{ mm}$ . Escórias com diâmetro na faixa de  $12,5 \text{ mm} \leq \phi < 19,1 \text{ mm}$  foram escolhidas por serem as que aparecem em maior quantidade retida (39,28 %) em uma dada peneira, avaliando assim o comportamento do material que se apresenta com maior frequência. Foram escolhidos a partir deste valor, um diâmetro inferior e superior, com o intuito de poder identificar mais claramente as reações que ocorrem a curtas e longas idades, respectivamente.

Para avaliar a influência da região onde são geradas e armazenadas as escórias, definiu-se por expor este material a três ambientes de distintas condições. No primeiro, o material é simplesmente estocado ao ar livre, exposto às variações de tempo e temperatura. Nos demais, foram utilizadas duas câmaras de temperatura e umidade controladas. Uma com elevada umidade, superior a  $95 \pm 2 \%$ , e a outra, com um nível de umidade mais baixa, equivalente a  $68 \pm 2 \%$  e temperatura de  $21^\circ \pm 2 \text{ C}$ .

O material foi disposto sobre uma grelha plástica, forrada por uma fina tela, colocada dentro de uma bandeja com furos na sua parte inferior. Este sistema foi empregado para, em primeiro lugar, evitar que a escória que estivesse armazenada a céu aberto mantivesse contato, ou ficasse submersa em água, no caso da ocorrência de chuva. E também, para favorecer a circulação de ar. Para manter o mesmo critério, adotou-se esta forma de acondicionamento para os distintos ambientes de cura, conforme está ilustrado na figura A1.1.

A caracterização do material foi sendo feita ao longo do tempo. A escória em análise é uma escória recolhida do pátio da empresa com 72 horas. Este foi o período de tempo necessário para a remoção da escória do forno, armazenamento a céu aberto e resfriamento lento através de água,



remoção do ferro das escórias e britagem do material. A escória com 72 horas de idade foi considerada, como sendo a escória de idade zero.



(a)



(b)

**Figura A1.1** Escórias separadas em diferentes granulometrias para cura em (a) ambiente natural e (b) câmara climatizada com umidade de  $68 \pm 2 \%$  e temperatura de  $21^\circ \pm 2^\circ \text{C}$

As idades de análise foram: 1 dia (equivalente à escória estar na realidade com 96 h), 91 dias, 182 dias (6 meses), 1260 dias (3 anos e 6 meses) e 1620 dias (4 anos e 6 meses). Nas respectivas datas de análise, o material era retirado do ambiente a que estava exposto e colocado submerso em álcool durante 14 dias. Este procedimento foi realizado com o objetivo do álcool penetrar ao longo de todo o grão de escória de maior dimensão, favorecendo a secagem da mesma, e com isso cessar o processo de hidratação, evitando possíveis reações que por ventura possam vir a ocorrer. A figura A1.2 mostra as 9 amostras (3 curas x 3 granulometrias) para cada idade de análise. Após a retirada da imersão e posterior evaporação do álcool, o material era armazenado em dessecadores com sílica gel, em vácuo.



**Figura A1.2** Escórias com 1 dia de idade sujeitas a curas distintas, submersas em álcool absoluto

Em virtude do grande número de análises, acabou-se por avaliar apenas a escória de granulometria intermediária, ficando as outras amostras armazenadas em dessecador para uma posterior avaliação.

A tabela A1.1 mostra esquematicamente as análises realizadas.

**Tabela A1.1** Análises realizadas nas escórias expostas ao longo do tempo a diferentes ambientes

	1 dia	91 dias			182 dias			3 anos e 6 meses			4 anos e 6 meses		
		U	A	S	U	A	S	U	A	S	U	A	S
Massa específica	X	X	X	X	X	X	X				X	X	X
Caracterização Química	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Caracterização Mineralógica (difração de raios x)	X								X		X	X	
Caracterização Microestrutural (MEV- elétrons retro-espalhados)	X							X	X	X	X	X	X

U: Escória armazenada em câmara úmida (umidade relativa superior a 95% e temperatura  $(23 \pm 2)^\circ$ )

A: Escória armazenada ao tempo (ambiente natural)

S: Escória armazenada em câmara climatizada (umidade relativa  $68 \pm 2\%$  e temperatura  $23 \pm 2$ )

## A1.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

### A1.2.1 Análise Física

Para determinação da distribuição granulométrica foram utilizadas peneiras em tela de malha quadrada, conforme especificação da ABNT 5734 (1991). A massa específica foi determinada a partir do frasco de Chapmann.

### A1.2.2 Análise Química

- A técnica utilizada para determinação da composição química foi fluorescência de raios-x, com uso de equipamento marca PHILIPS, modelo Simultâneo 2600, de 3 giros na superfície da amostra, em um tempo de integração de 30s.

### A1.2.3 Análise Mineralógica

A análise mineralógica foi realizada através de difração de raios-x, em equipamento marca SIEMENS, modelo D500, radiação  $\text{CuK}\alpha$ , tensão de 36 kV, corrente 20mA, varredura com passo  $0,02^\circ 2\theta$ .

### A1.2.4 Análise microestrutural

A análise microestrutural das pastas foi feita com microscópio eletrônico de varredura (MEV) – elétrons retro-espalhados, marca JEOL, modelo JSM-5800<sup>1</sup>, com um espectômetro por dispersão em energia (EDS)<sup>2</sup>, marca LORAN e limite de detecção de 0,15 kev.

<sup>1</sup> Localizado no Centro de Microscopia - UFRGS

<sup>2</sup> EDS- "Energy Dispersive Spectrometre"



### A1.2.5 Moagem

Nos ensaios onde foi necessário a moagem das escórias, empregou-se um moinho de bolas, marca SERVITECH, modelo ST242, com jarros de capacidade de 1000ml.

## A1.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Do ponto de vista físico, determinou-se a distribuição granulométrica da amostra original, a qual encontra-se discriminada na tabela A1.2 e as massas específicas (NBR 9937/87) ao longo do tempo, conforme indicado na tabela A1.3.

**Tabela A1.2** Composição granulométrica da escória de aciaria

Abertura (mm)	% Retida	% Acumulada
31,5	0	
25,4	1,1	1,1
19,1	16,42	17,52
12,5	39,28	56,80
9,52	16,08	72,88
6,30	10,5	83,38
4,75	5,68	89,06
2,36	6,72	95,78
1,18	3,04	98,82
<1,18	1,18	100

**Tabela A1.3** – Massa Específica da escória de aciaria elétrica ao longo do tempo

	Massa Específica kg/dm <sup>3</sup>			
	1	91	182	4 a 1/2
Umido	3,52	3,72	3,71	3,90
Natural	3,52	3,94	3,82	3,69
Seco	3,52	4,03	4,15	4,13

### A1.3.1 Análise dos Resultados e Discussão

Os resultados obtidos sofreram tratamento estatístico, através de Análise de Variância (ANOVA), onde foi avaliado a influência da idade e do tipo de exposição na massa específica, ao nível de significância de 95 %. A tabela A1.4 sintetiza os resultados desta análise.

**Tabela A1.4** Análise da ANOVA do efeito da idade e do ambiente na massa específica da escória

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Idade	3	0,215528	-	-	NS
Ambiente	2	0,142867	-	-	NS
Idade x Ambiente	6	0,036578	-	-	NS
ERRO	12				

Gdl: Grau de Liberdade

MQ: Média Quadrática

F<sub>calc</sub>: Valor calculado de F

F<sub>0,05</sub>: Valor tabelado de F para o nível de significância de 5 %

S: Significativo

NS: Não Significativo

\*Significância: F<sub>calc</sub> > F<sub>0,05</sub> : S

F<sub>calc</sub> < F<sub>0,05</sub> : NS

Através da ANOVA, verifica-se que nenhuma das variáveis apresentou influência significativa nos resultados de massa específica.

Para escórias LD, KAWAMURA et al. (1983), em estudo semelhante com escórias expostas ao ambiente durante 3 meses, verificaram uma diminuição da massa específica da escória em virtude da formação de uma camada porosa composta por produtos de hidratação. Encontraram superficialmente silicato de cálcio hidratado e carboaluminato hidratado de cálcio. COOMARASAMY e WALZAK (1995). Identificaram principalmente a formação de carbonato de cálcio na superfície da escória LD exposta a intempéries

#### A1.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

As tabelas A1.5 a A1.7 e figuras A1.3 a A1.5 apresentam as variações da composição química da escória ao longo do tempo, para os ambientes úmido, natural e seco, respectivamente.

**Tabela A1.5** Composição química da escória, exposta a ambiente úmido, ao longo do tempo

	Ambiente Úmido (25°C ± 2, 99 % de umidade)				
	1 dia	91 dias	182 dias	3 anos 6 meses	4 anos 6 meses
SiO <sub>2</sub>	14,49	11,55	10,31	9,86	9,87
CaO	30,73	30,08	30,63	31,57	31,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,85	4,58	3,67	3,64	4,25
FeO	31,4	37,24	41,04	38,44	39,94
MgO	7,25	5,97	4,40	5,25	4,07
Na <sub>2</sub> O	,001	0,001	0,001	0,001	0,001
K <sub>2</sub> O	0,12	0,07	0,05	0,05	0,04
TiO <sub>2</sub>	0,34	0,31	0,35	0,30	0,36
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,09	0,09	0,08	0,10
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,73	2,20	2,17	3,15	2,66
MnO	3,73	4,25	4,57	4,91	4,50
Pb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,94	0,88	0,99	0,81	0,90

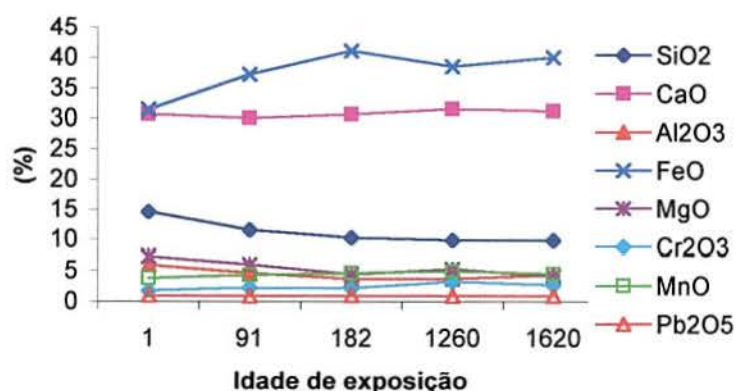
**Tabela A1.6** Composição química da escória, exposta a ambiente natural, ao longo do tempo

	Ambiente Natural				
	1 dia	91 dias	182 dias	3 anos 6 meses	4 anos 6 meses
SiO <sub>2</sub>	14,49	11,14	9,06	11,03	10,90
CaO	30,73	30,86	31,3	33,78	32,49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,85	4,82	3,45	5,41	4,20
FeO	31,4	37,60	39,65	35,29	38,27
MgO	7,25	4,89	3,45	5,97	5,26
Na <sub>2</sub> O	,001	0,001	0,001	0,001	0,001
K <sub>2</sub> O	0,12	0,05	0,04	0,06	0,05
TiO <sub>2</sub>	0,34	0,34	0,04	0,36	0,34
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,09	0,1	0,08	0,08
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,73	2,59	3,35	1,71	1,46
MnO	3,73	4,21	5,2	3,79	3,79
Pb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,94	0,91	0,97	0,92	0,87

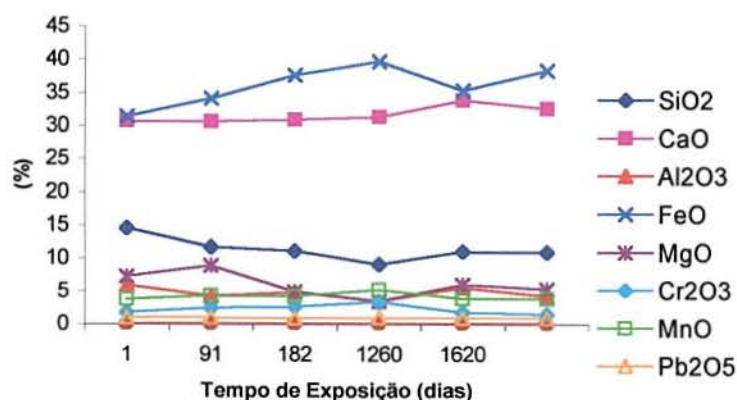


**Tabela A1.7** Composição química da escória, exposta a ambiente seco, ao longo do tempo

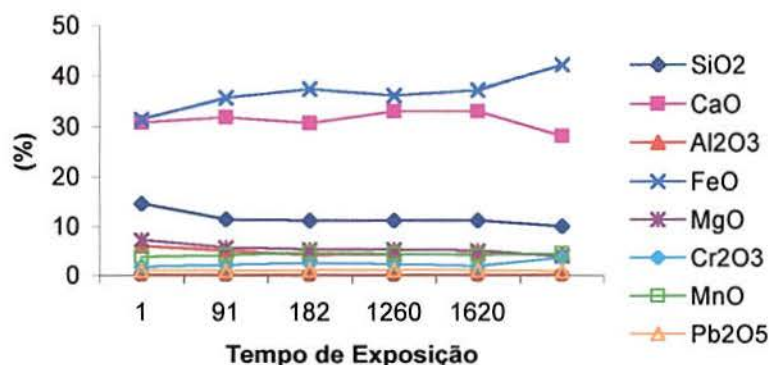
	Ambiente seco ( $23^{\circ} \pm 2$ , 65 % de umidade)				
	1 dia	91 dias	182 dias	3 anos 6 meses	4 anos 6 meses
SiO <sub>2</sub>	14,49	11,17	11,18	11,20	9,92
CaO	30,73	30,63	32,97	32,95	28,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,85	4,11	4,321	4,13	4,26
FeO	31,4	37,49	36,18	37,17	42,14
MgO	7,25	5,18	5,27	4,95	3,83
Na <sub>2</sub> O	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
K <sub>2</sub> O	0,12	0,06	0,06	0,04	0,05
TiO <sub>2</sub>	0,34	0,34	0,36	0,34	0,33
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,73	2,51	2,20	1,83	3,56
MnO	3,73	4,56	4,38	4,01	4,448
Pb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,94	1,00	1,00	1,04	0,84



**Figura A1.3** Composição química da escória ao longo do tempo, exposta em ambiente úmido



**Figura A1.4** Composição química da escória ao longo do tempo, exposta em ambiente natural



**Figura A1.5** Composição química da escória ao longo do tempo, exposta em ambiente seco

#### A1.4.1 Análise dos Resultados e Discussão

A análise estatística foi realizada para cada elemento, em separado, verificando a influência da idade e tipo de exposição a que a escória foi submetida. Apenas o silício e o ferro, na forma de óxidos, sofreram influência destas variáveis.

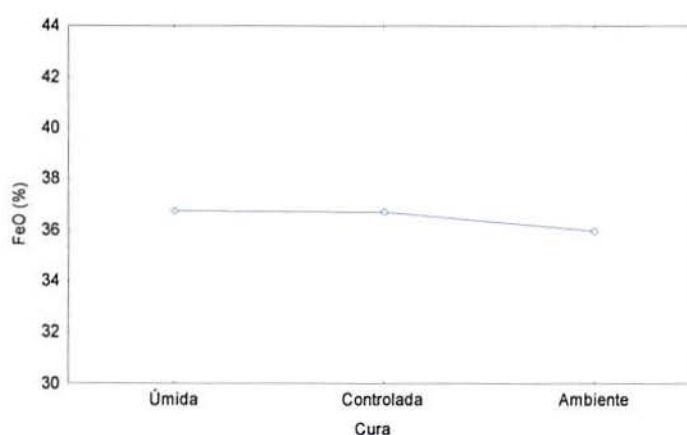
A tabela A1.8 sintetiza os resultados obtidos na análise estatística quanto ao efeito da exposição e idade no teor de óxido de ferro das escórias, ao nível de significância de 95 %.

**Tabela A1.8** Análise de Variância (ANOVA) do efeito da exposição e idade no teor de óxido de silício da escórias

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Exposição	2	1,5252	-	-	S
Idade	3	88,4495	-	-	S
Exposição x Idade	6	1,6512	-	-	S
ERRO	12				

Com base nos resultados obtidos o ferro, na forma de óxido é influenciado significativamente pela idade, tipo de exposição a que é submetida e pela interação destas duas variáveis.

A figura A1.6 mostra a influência da exposição no teor de óxido de ferro, em massa.



**Figura A1.6** Teor de ferro, na forma de óxido, em massa, em função do tipo de exposição

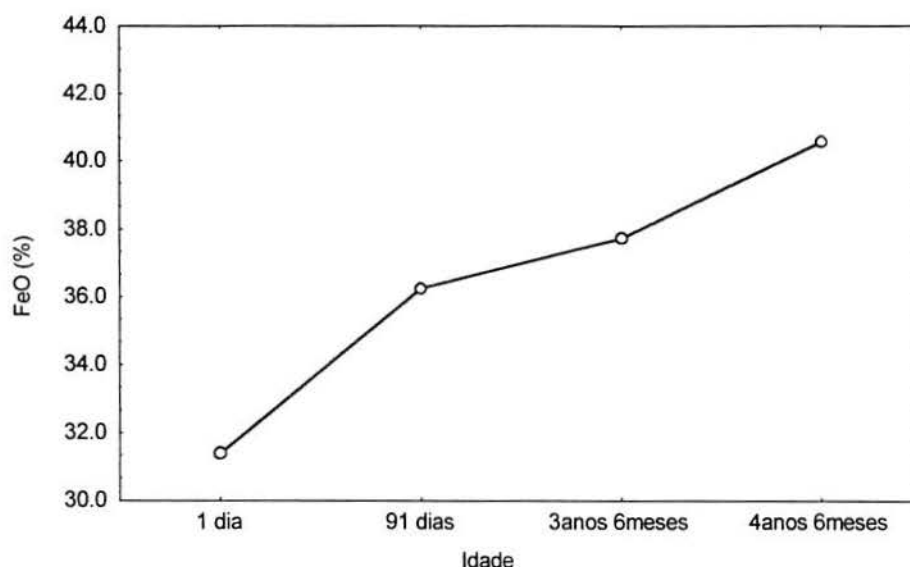


Observa-se que as escórias expostas ao ambiente apresentaram um menor teor de ferro, em massa, do que as expostas em ambiente úmido e com umidade e temperatura controladas. Este fato pode estar provavelmente associado às condições de temperatura e umidade nestes dois ambientes serem mais favoráveis para as reações de hidratação e oxidação do ferro e com isso, percentualmente proporcionar um acréscimo no teor de ferro, expresso na forma de óxido e a uma provável lixiviação de algum outro composto.

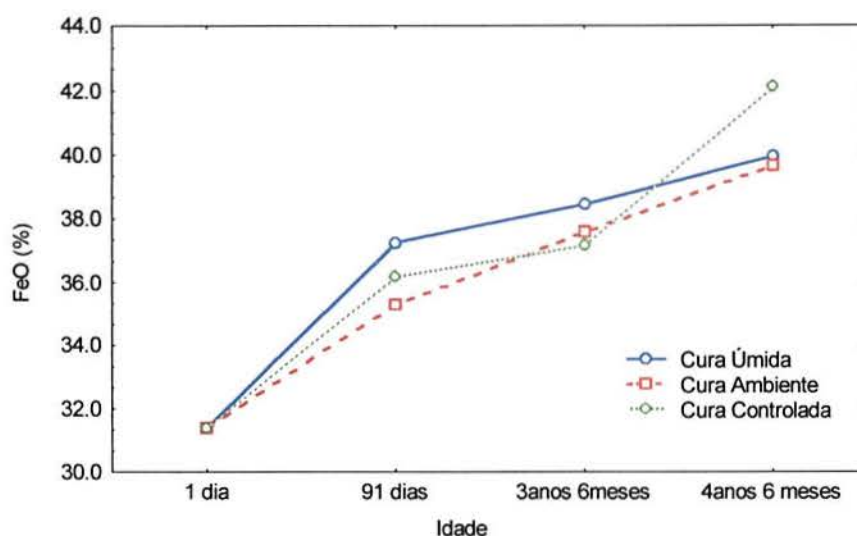
Para estabelecer-se com precisão quais são os fenômenos que estão ocorrendo deve ser realizado uma análise elementar, por exemplo com ICP associado a análises complementares tais como difração de raios-x e microscopia eletrônica de varredura. Esta metodologia complementar está sendo desenvolvida e discutida por BREHM et al.(2001).

Verifica-se que o teor de ferro aumenta com o tempo, como pode ser visualizado na figura A1.7. Por este acréscimo ser significativo ao longo do tempo, têm-se indícios que compostos à base de ferro podem estar envolvidos com a expansibilidade da escória.

Na figura A1.8 fica evidenciado a influência do tipo de exposição. Enquanto que as escórias expostas ao ambiente e câmara úmida tiveram um elevado ganho de massa até aos 91 dias, tendendo a estabilizar após esta data, as escórias armazenadas em câmara com temperatura e umidade controlada apresentaram dois períodos onde houve um aumento significativo de massa, até os 91 dias e novamente a partir dos 3 anos e meio. Tal fato sugere a existência de compostos encapsulados no interior dos grãos de escória, que somente após longos períodos vão entrar em contato com oxigênio e umidade, ocorrendo as reações de oxidação, hidratação ou lixiviação. Verifica-se que a taxa de ganho de massa de ferro para escórias expostas ao ambiente foi menor que das demais exposições.



**Figura A1.7** Evolução do ganho de massa de ferro, na forma de óxido, ao longo do tempo



**Figura A1.8** Teor de ferro, na forma de óxido, em massa, em função da interação entre a idade e o tipo de exposição

A tabela A1.9 sintetiza os resultados obtidos na análise estatística quanto ao efeito da exposição e idade no teor de óxido de silício das escórias, ao nível de significância de 95 %.

**Tabela A1.9** Análise de Variância (ANOVA) do efeito da exposição e idade no teor de óxido de silício da escórias

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Exposição	2	0,51750	25,0913		S
Idade	4	19,83555	961,7400		S
Exposição x Idade	8	0,99023	48,0119		S
ERRO	15	0,020625			

Observa-se que há influência significativa do tipo de exposição a que é submetida a escória e da idade de exposição, quanto na interação entre estas duas variáveis sobre o teor de óxidos de silício.

As figuras A1.9 a A 2.11 ilustram o teor de silício em função do tipo de cura, da idade e da interação entre estas duas variáveis, respectivamente.

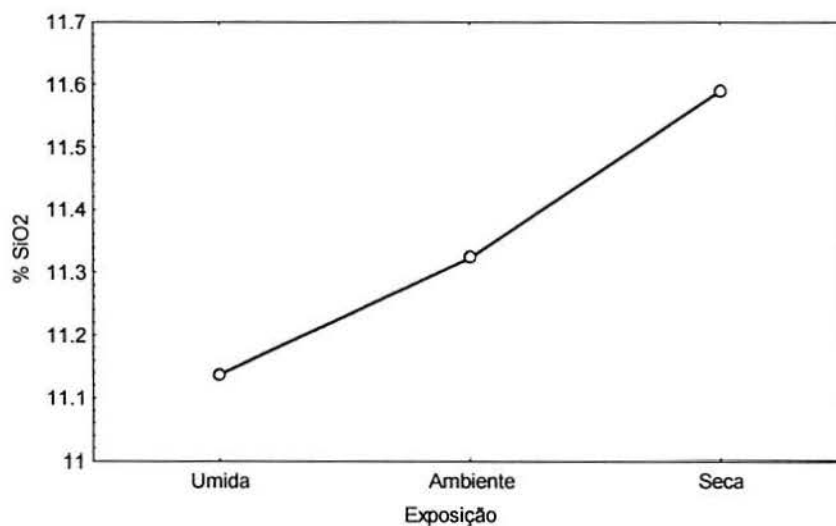
Na figura A1.9 verifica-se um aumento, quase linear, do teor de silício, da cura úmida, a cura natural e seca. Esta constatação está provavelmente associada a formação de produtos hidratados acelerada pelas condições das diferentes formas de exposição.

Na figura A1.10 verifica-se um decréscimo do teor de sílica com o decorrer do tempo. Este fato está, provavelmente associado, a formação de novos compostos envolvendo o ferro, de modo que, proporcionalmente ocorrerá uma diminuição do silício, que encontra-se expresso na forma de óxido de silício.

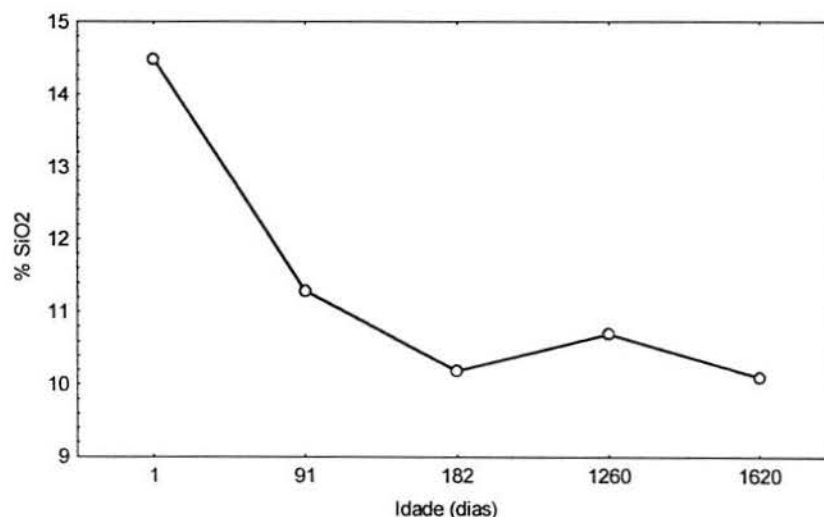


Na figura A1.11 observa-se a influência das condições de exposição ao longo do tempo. Para as curas úmida e seca observa-se uma tendência de comportamento, ou seja, de diminuir ao longo do tempo, o que não é verificado para a cura ambiente tão acentuadamente, evidenciando assim, a influência das condições ambientais, como por exemplo, da exposição a diferentes estações do ano.

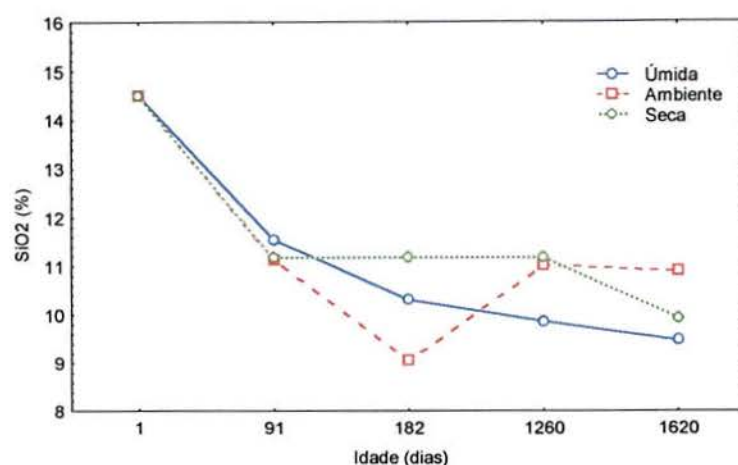
Cabe ressaltar, que este comportamento de ora diminuir, ora aumentar o teor de sílica ao longo do tempo, para a cura ao ambiente, pode decorrer, em primeiro lugar, da própria variabilidade da composição química da escória, a qual devido à pequena quantidade amostrada, não foi possível diluí-la. E em segundo lugar, pode ser decorrente da formação de compostos envolvendo um maior ou menor teor de silício, o que poderá ser comprovado ou não na caracterização mineralógica.



**Figura A1.9** Variação do teor de óxido de silício em função do tipo de exposição



**Figura A1.10** Variação do teor de óxido de silício em função da idade de exposição



**Figura A1.11** Teor de óxido de silício em função da interação entre a idade e tipo de cura

A influência do tipo de cura e idade sobre os óxidos de cálcio, magnésio e alumínio, encontram-se nas tabelas 2.10 a 2.12, respectivamente. Não foi verificado, para nenhum destes elementos, influência significativa da idade e do tipo de cura.

**Tabela A1.10** Análise de Variância (ANOVA) do efeito da exposição e idade no teor de óxido de cálcio da escórias

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Exposição	2	2.4527	-	-	NS
Idade	4	5.625360	-	-	NS
Exposição x Idade	8	3.499162	-	-	NS
ERRO	15				

**Tabela A1.11** Análise de Variância (ANOVA) do efeito da exposição e idade no teor de óxido de magnésio da escórias

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Exposição	2	0,022005	-	-	NS
Idade	4	8,236216	-	-	NS
Exposição x Idade	8	0,994725	-	-	NS
ERRO	15				

**Tabela A1.12** Análise de Variância (ANOVA) do efeito da exposição e idade no teor de óxido de alumínio da escórias

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Exposição	2	0,309789	-	-	NS
Idade	4	3,533662	-	-	NS
Exposição x Idade	8	0,507372	-	-	NS
ERRO	15				

**Tabela A1.13** Análise de Variância (ANOVA) do efeito da exposição e idade no teor de óxido de ferro da escórias

FATOR	GDL	MQ	F <sub>Calc</sub>	F <sub>0,05</sub>	Significância*
Exposição	2	3,499491	-	-	NS
Idade	4	67,66158	-	-	NS
Exposição x Idade	8	5,40963	-	-	NS
ERRO	15				



## A1.5 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Com vistas a determinar a formação de compostos na escória ao longo do tempo, realizou-se uma análise mineralógica por difração de raios-x.

As figuras de A1.12 a A1.15 apresentam o difratograma das escórias ao longo do tempo. A primeira mostra o da escória com 1 dia de idade. A figura A.1.13 mostra o difratograma da escória com 3 anos e 6 meses exposta à cura ambiente e as figuras A1.14 e A1.15 os difratogramas das escórias com 4 anos e 6 meses exposta a cura úmida e natural, respectivamente.

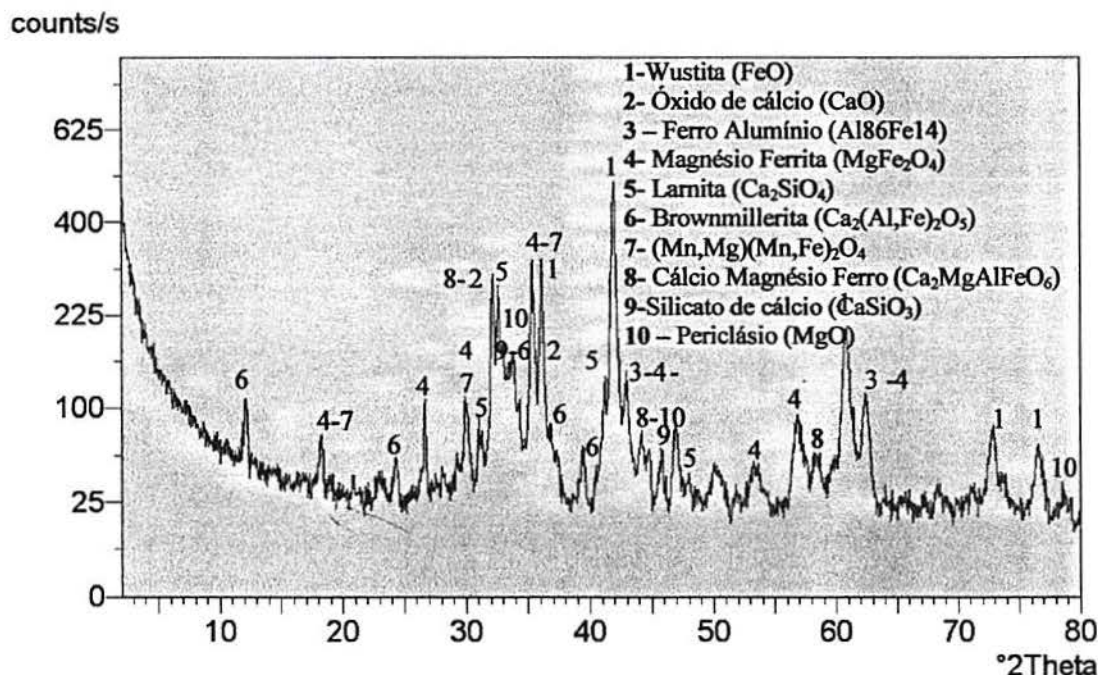


Figura A1.12 Difratograma da escória com 1 dia de idade

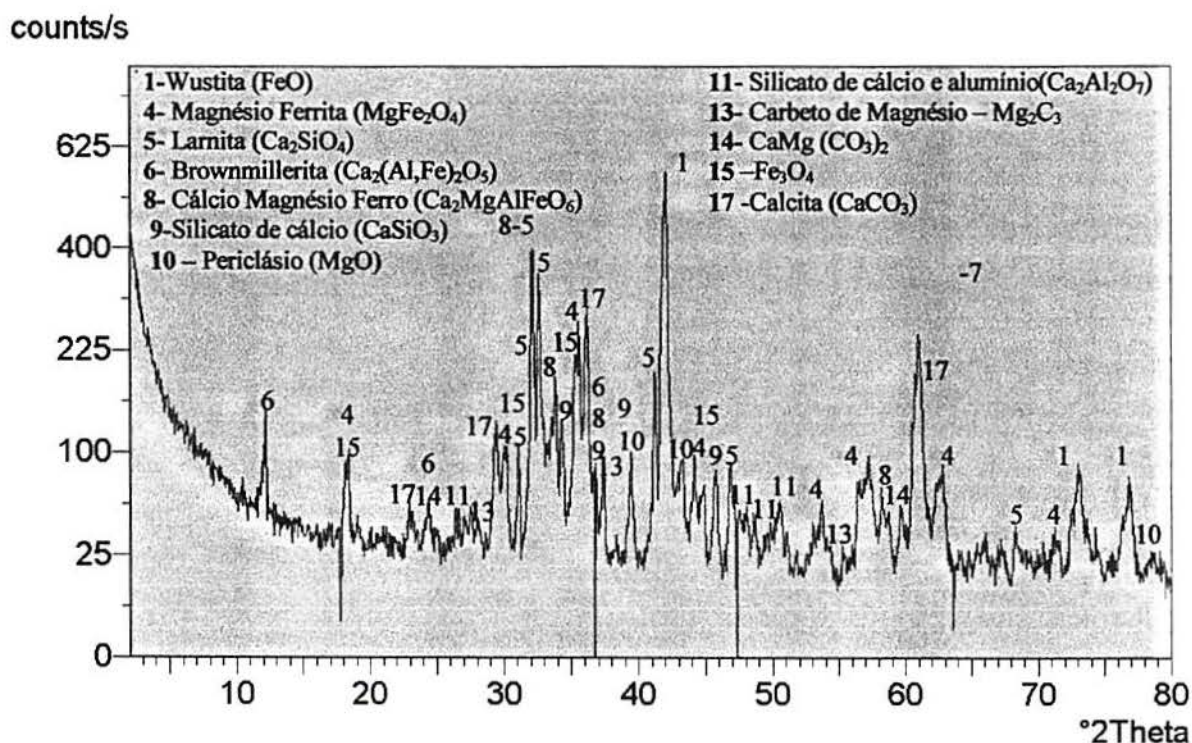


Figura A1.13 Difratograma da escória com 1260 dias de idade submetida a cura ambiente



counts/s

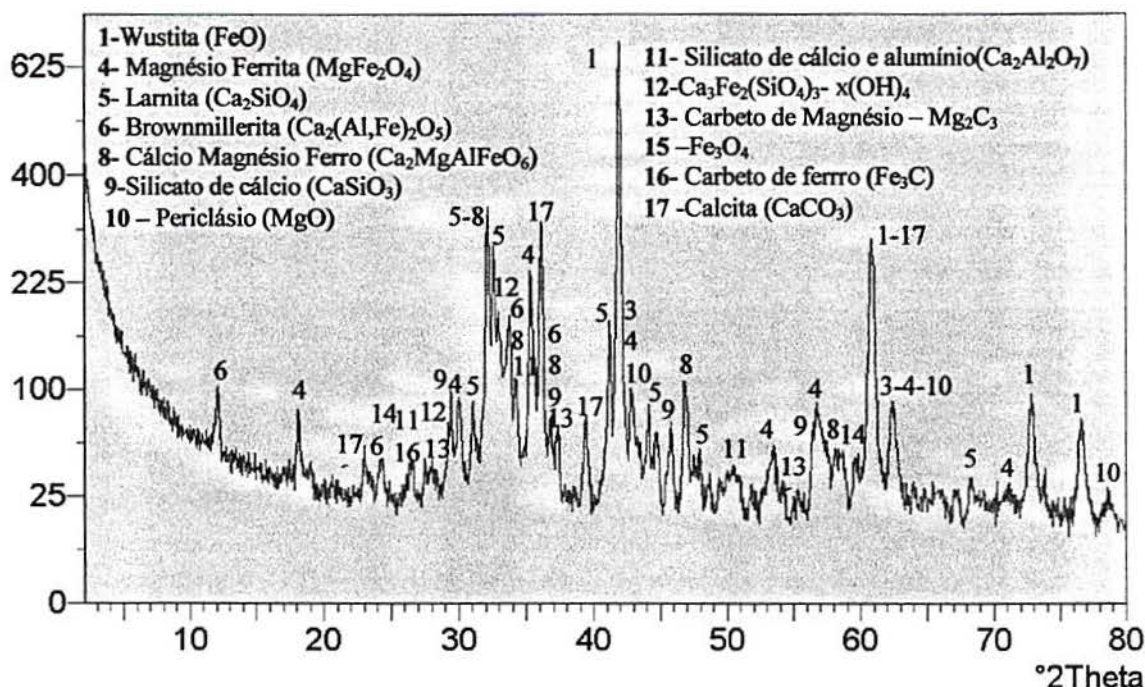


Figura A1.14 Difrátograma da escória com 1620 dias de idade submetida a cura ambiente

counts/s

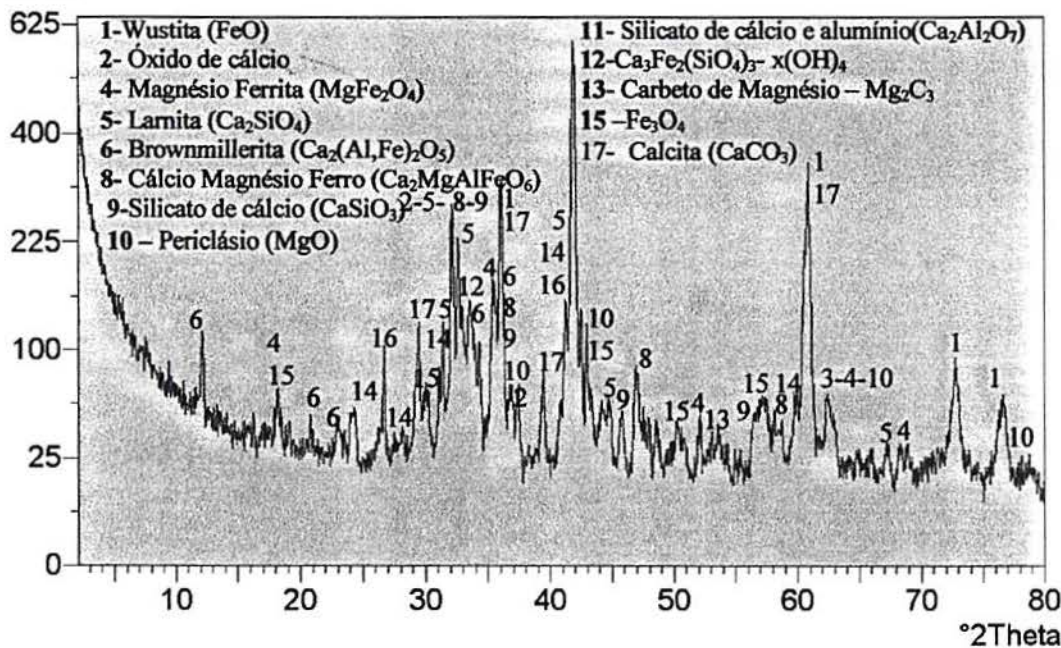


Figura A1.15 Difrátograma da escória com 1620 dias de idade submetida a cura úmida

A tabela A1.14 apresenta os compostos minerais encontrados nas escórias analisadas.



**Tabela A1.14** Compostos mineralógicos da escória ao longo do tempo exposto ao ambiente e cura úmida

	Idade			
	1 dia	3anos e 6meses (cura ambiente)	4 anos e 6 meses	
			(cura ambiente)	(cura úmida)
1- Wustita	X	X	X	X
2- Óxido de cálcio	X			X
3- Alumínio-Ferro	X		X	X
4- Magnésio Ferrita ( $MgFe_2O_4$ )	X		X	X
5- Larnita ( $Ca_2SiO_4$ )	X		X	X
6- Browmillerita ( $Ca_2(Al,Fe)_2O_5$ )	X		X	X
7- - $(Mn,Mg)(Mn,Fe)_2O_4$	X			
8- Cálcio, magnésio, ferro ( $Ca_2MgAlFeO_6$ )	X	X	X	X
9- Silicato de Cálcio ( $CaSiO_3$ )	X	X	X	X
10 – Periclásio ( $MgO$ )	X	X	X	X
11 – Silicato de cálcio e alumínio ( $Ca_2Al_2SiO_7$ )		X	X	
12 – $Ca_3Fe_2(SiO_4)_3 \cdot x(OH)_4$			X	
13 – $Mg_2C_3$		X	X	
14 – $CaMg(CO_3)_2$		X		X
15 – $Fe_3O_4$		X		X
16 – $Fe_3C$				X
17 – Calcita ( $CaCO_3$ )		X	X	X

### A1.5.1 Análise dos Resultados e Discussão

Com base na tabela A1.14 verifica-se que alguns compostos, quais sejam: wustita, magnésio-ferrita, larnita, browmillerita, cálcio-magnésio-ferro, silicato de cálcio e periclásio, foram identificados em todas idades e ambientes analisados. Cabe salientar a presença, após 4 anos e 6 meses, em cura úmida e ambiente, do periclásio e larnita, compostos estes apontados pela bibliografia como compostos que contribuem para a expansão. A hidratação do  $MgO$  provocará a formação do  $Mg(OH)_2$ , denominada de brucita (GLASSER, 1990), com um aumento de volume na ordem de 119 %. A transformação da larnita  $\beta$  para  $\gamma$ , produz um aumento de volume de cerca de 12%, causando o fenômeno de esfarelamento (LEE, 1974; BENSTED et al., 1974). Com isso fica evidenciado que o tempo não é condição suficiente para eliminar problemas expansivos das escórias.

Observa-se também, após este período a presença de wustita, que por sua característica instável já deveria ter reagido e transformado-se em outras fases. A explicação por isto não ter ocorrido está no provável encapsulamento desta wustita, que na preparação das amostras via moagem para a análise de raios-x, tornam a wustita exposta.

Verifica-se que, ao longo do tempo, novos compostos são formados, principalmente decorrentes do fenômeno de hidratação, oxidação e carbonatação, tais como, a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ),  $\text{Fe}_3\text{C}$ , magnetita,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{C}_3$ ,  $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3 \cdot x(\text{OH})_4$  e  $\text{CA1Al}_2\text{SiO}_7$ . Os últimos dois compostos só foram observados após 4 anos e 6 meses de idade.

O óxido de cálcio, também citado na bibliografia (GEISELER e SCHLOSSER, 1988; MONTGOMERY e WANG, 1991; COOMARASAMY e WALZAK, 1995) como sendo responsável pela expansibilidade é observado com um dia e após 4 anos e 6 meses apenas na escória exposta em ambiente úmido, sugerindo que o óxido de cálcio pode ser oriundo da reação de precipitação.

Verifica-se a influência do tipo de cura na formação dos compostos mineralógicos para uma mesma idade.

Os compostos encontrados na escória com 1 dia de idade estão de acordo com os apresentados na bibliografia (ILAFA, 1995; MÔNACO e WU, 1994). Para escórias com idade superior, com exceção da calcita e magnetita, os compostos mineralógicos não são comumente apresentados.

## **A1.6 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL**

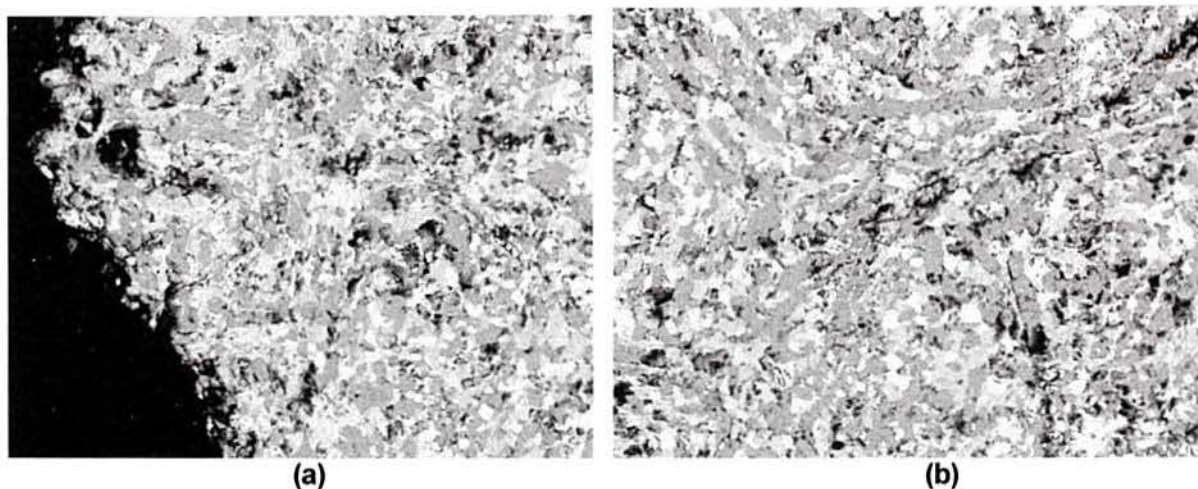
A análise microscópica foi realizada em microscópio eletrônico de varredura, elétrons retro-espalhados.

As escórias foram investigadas na região da borda e na parte central. Isto porque buscava-se encontrar a presença de óxidos não hidratados na parte central, como os observados por GUMIERE (1999), que encontrou para escórias LD, a presença de óxido de magnésio, situado na parte central da amostra, envolto por fases de  $\text{FeO}$  e  $\text{MnO}$ .

### **A1.6.1 Apresentação e análise dos resultados**

A figura A1.16 (a) e (b) mostra, respectivamente, a micrografia em elétrons retro-espalhados da borda e da região central da escória com 1 dia de idade. Aparentemente, os compostos em ambas regiões são os mesmos. Não observou-se, na borda, a existência de uma nova fase resultante de reações da escória com o meio ambiente.

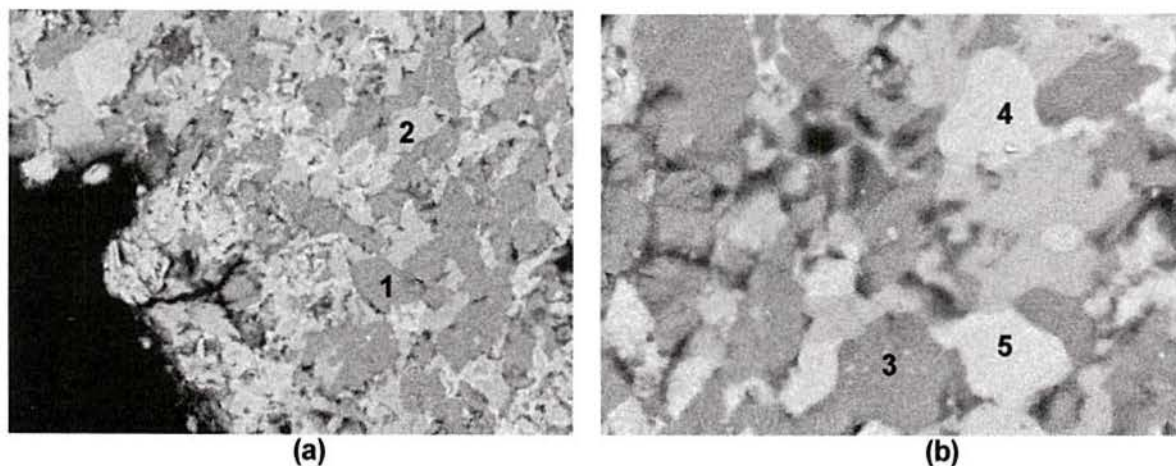




**Figura A1.16** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados da escória de aciaria elétrica com 1 dia de idade, ampliação 500x (a) na borda da amostra (b) no centro da amostra

A figura A1.17 (a) e (b) apresentam ambas as regiões em detalhe. A tabela A1.15 apresenta os resultados da composição química determinada por EDS, de cada fase identificada por números, na figura A1.17.

A fase mais clara (5) é uma fase rica em óxido de ferro misturada com magnésio, manganês e cálcio. No oposto, a fase mais escura (3) é uma fase predominantemente de compostos a base de cálcio, mas também rica em sílica. E a fase de coloração intermediária (4) é uma mistura de ferro, cálcio, silício e magnésio. Fases similares a estas foram observadas por COOMARASAMY e WALZAK, 1995). Não foi possível estabelecer relação entre as fases encontradas, calculadas mediante cálculos estequiométricos e as identificadas na difração de raios-x.



**Figura A1.17** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados da escória de aciaria elétrica com 1 dia de idade (a) na borda da amostra (ampliação 1000x) (b) no centro da amostra (ampliação 3000x)

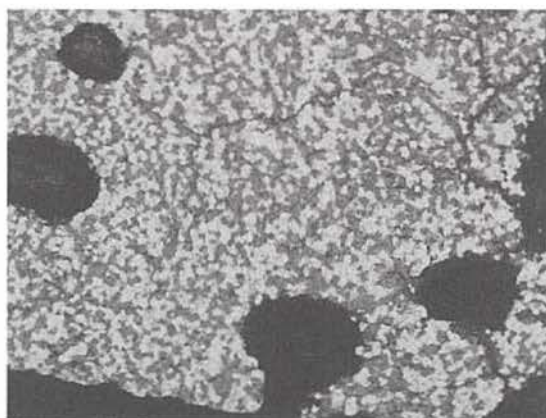
**Tabela A1.15** Composição da escória de aciaria com 1 dia de idade determinada por EDS

	Elementos (%)									
	Ca	Fe	Mg	Al	Si	Mn	C	O	Ti	Cr
1	62,1	3,3		0,5	13,8		9,1	11,2		
2	35,0	42,5	0,2	4,3			7,8	7,3	1,0	1,9
3	62,2	4,4		0,4	13,6		8,5	11,0		
4	36,7	46,9		4,6	0,7		5,8	4,3		0,9
5	1,1	72,3	5,4		0,3	11,8		3,3		5,9

Ao analisar a escória de 3 anos e 6 meses, expostas ao meio ambiente, verificou-se uma alteração principalmente próximo a borda da amostra.

A primeira observação feita foi a da erosão superficial, verificando-se um aumento de porosidade próximo a borda, como pode ser visto na figura A1.18. Este desgaste superficial pode ser decorrente, da formação de uma camada porosa de produtos de hidratação, de baixa aderência (KAWAMURA e TORII, 1983).

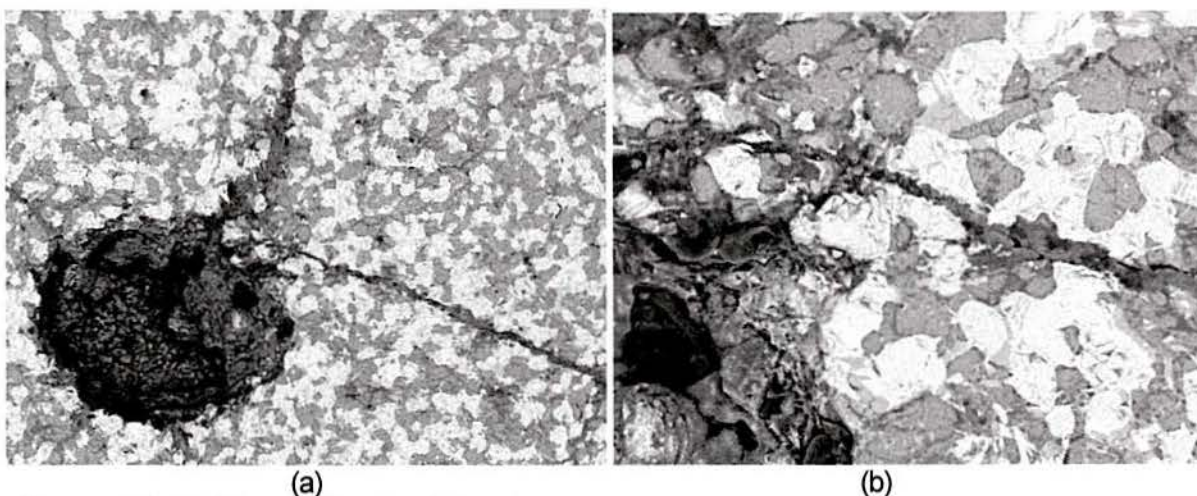
Próximo a borda, mas em direção a parte central, constata-se a existência de grandes zonas escuras, das quais partem fissuras que encontram-se preenchidas por uma fase de elementos. Na figura A1.19 fica evidenciado este fenômeno.



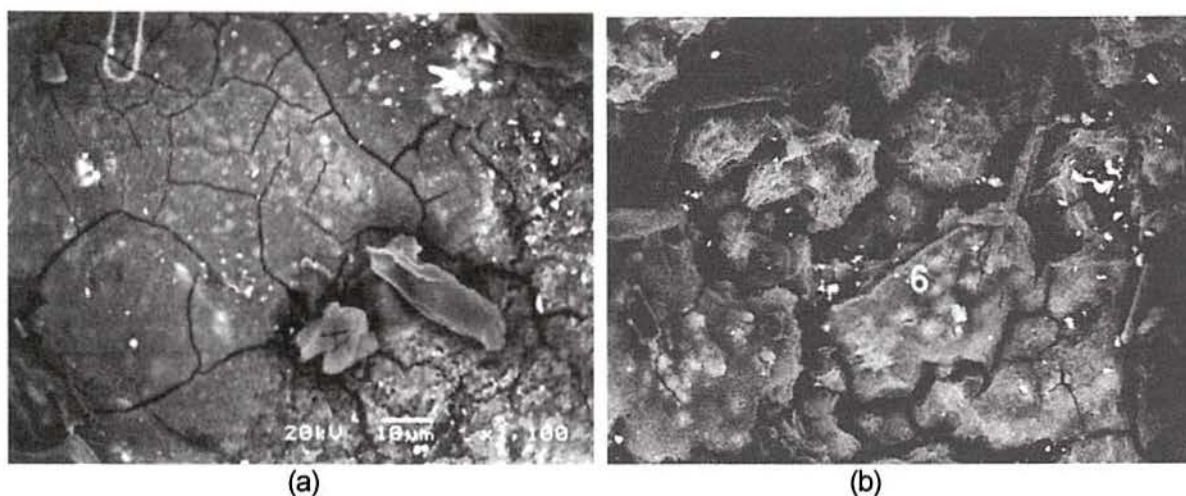
**Figura A1.18** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados da escória de aciaria elétrica com 3 anos e 6 meses de idade. Cura ao ambiente (ampliação 3000x)

Fissuras de menor dimensão também são identificadas no interior da fase de coloração mais escura e rica em cálcio, como pode ser visto na figura A1.20 (a) e (b), principalmente na primeira onde o interior apresenta completamente fissurado.





**Figura A1.19** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados da escória de aciaria elétrica 3 anos e 6 meses de idade. Cura ao ambiente (a) zona de coloração escura, próxima a borda - ampliação 120x (b) detalhe da fissura já preenchida por fase de elementos, ampliação 450 x

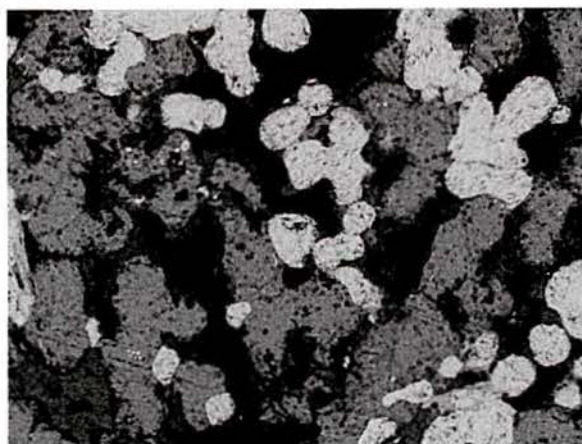


**Figura A1.20** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados do interior da vesícula (a) ampliação 1100x (b) detalhe do interior da vesícula (ampliação 1400 x)

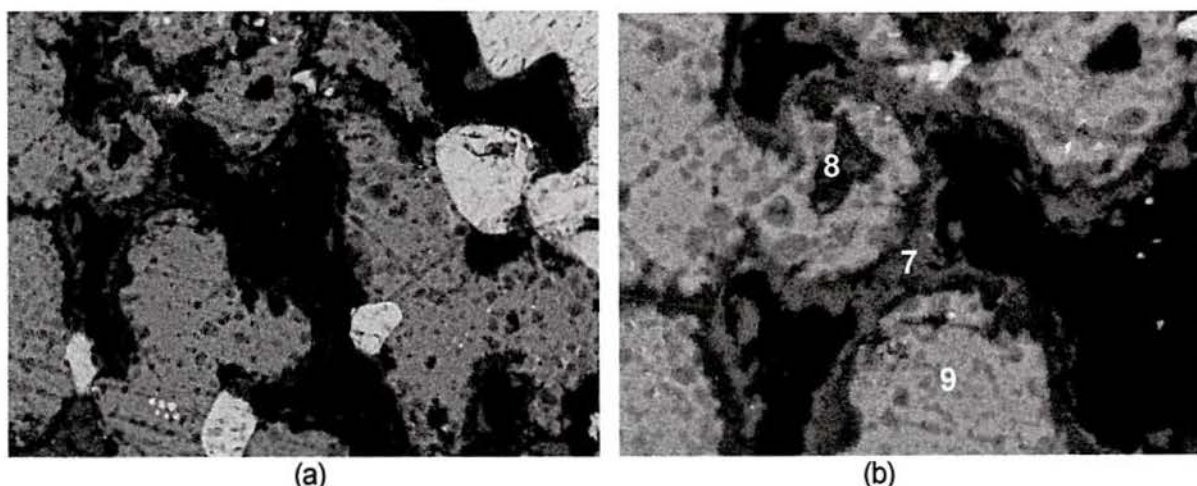
Em alguns pontos observou-se a existência de uma fase, rica em cálcio, envolvendo a fase de coloração mais escura, rica em cálcio e com alto teor de silício. Esta envoltória é resultante, provavelmente, das reações de hidratação e carbonatação da escória. O teor de carbono encontrado (para ponto 7 – figura A1.22) foi bastante elevado, acima do esperado, devendo este fato, provavelmente, a resina usada para embutimento da amostra.

A figura A1.21 mostra uma vista geral destas fases, as quais aparecem em detalhe na figura A1.22.

A composição química das fases analisadas nas micrografias das figuras A1.20 e A1.22 encontram-se na tabela A1.16.



**Figura A1.21** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados do interior da vesícula (a) ampliação 1100x (b) detalhe do interior da vesícula (ampliação 1400 x)



**Figura A1.22** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados evidenciando as três principais fases encontradas na escória (a) ampliação 1000x (b) detalhe da zona de hidratação (ampliação 2000 x)

**Tabela A1.16** Composição da escória de aciaria com 3 anos e 6 meses, exposta ao meio ambiente, determinada por EDS

	Elementos (%)									
	Ca	Fe	Mg	Al	Si	Mn	C	O	Ti	Cr
6	57,0	31,3	1,0	6,9		2,2				1,6
7	30,0	2,3	0,5	2,1			52	4,1		
8	60,0	3,3	0,5	2,1	13,6		9,5	11,3		
9	0,9	66,3	16,9			13,7	2,4			0,7

As alterações relatadas para escória exposta ao ambiente, seja do ponto de vista da formação de uma nova fase ou aparecimento de fissuras, não foram verificadas para a escória de mesma idade, porém condicionada na câmara úmida. As fases apresentadas se distribuíram de forma homogênea ao longo da seção transversal.

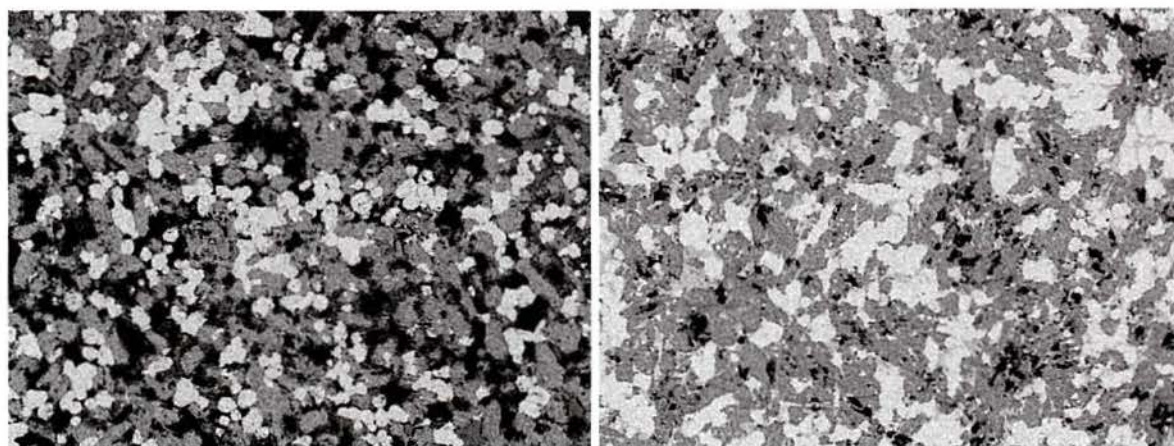


A figura A1.23 exemplifica as fases existentes na escória com 3 anos e 6 meses de idade exposta em ambiente de alta umidade, apresentando um aspecto geral da zona próxima da borda e central da amostra.

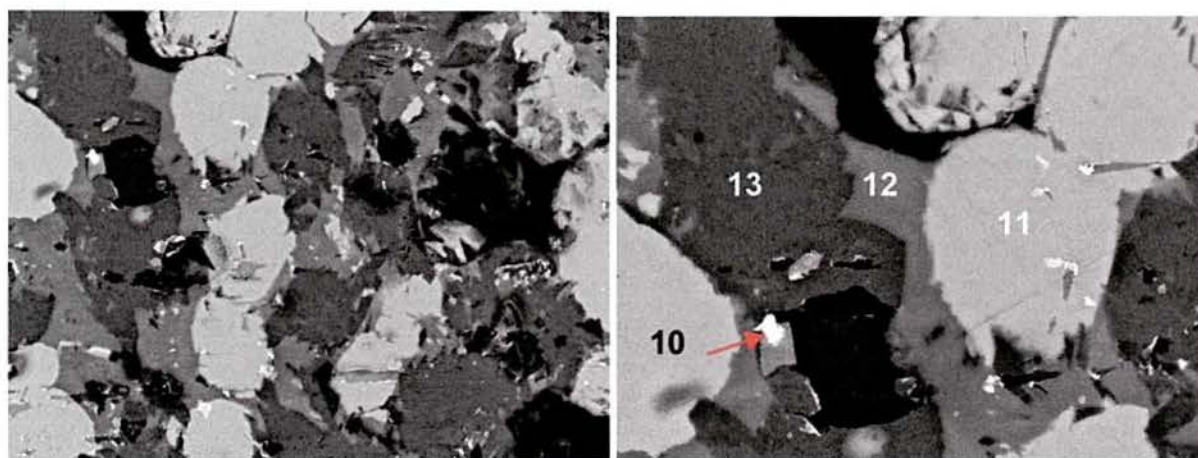
Por último, para esta idade, analisou-se a escória exposta a ambiente com baixa umidade (cura em câmara climatizada), também não foi observado o comportamento apresentado pela escória ao ambiente natural.

Verificou-se predominantemente a existência de três fases, conforme ilustra a figura 2.24. Ao contrário do observado na figura A1.22(b), as fases estão bem definidas, não sendo formadas por reações que ocorreram no período de cura.

A composição química, determinada por EDS, das fases identificadas nas micrografias das figuras A1.24 encontram-se na tabela A1.17.



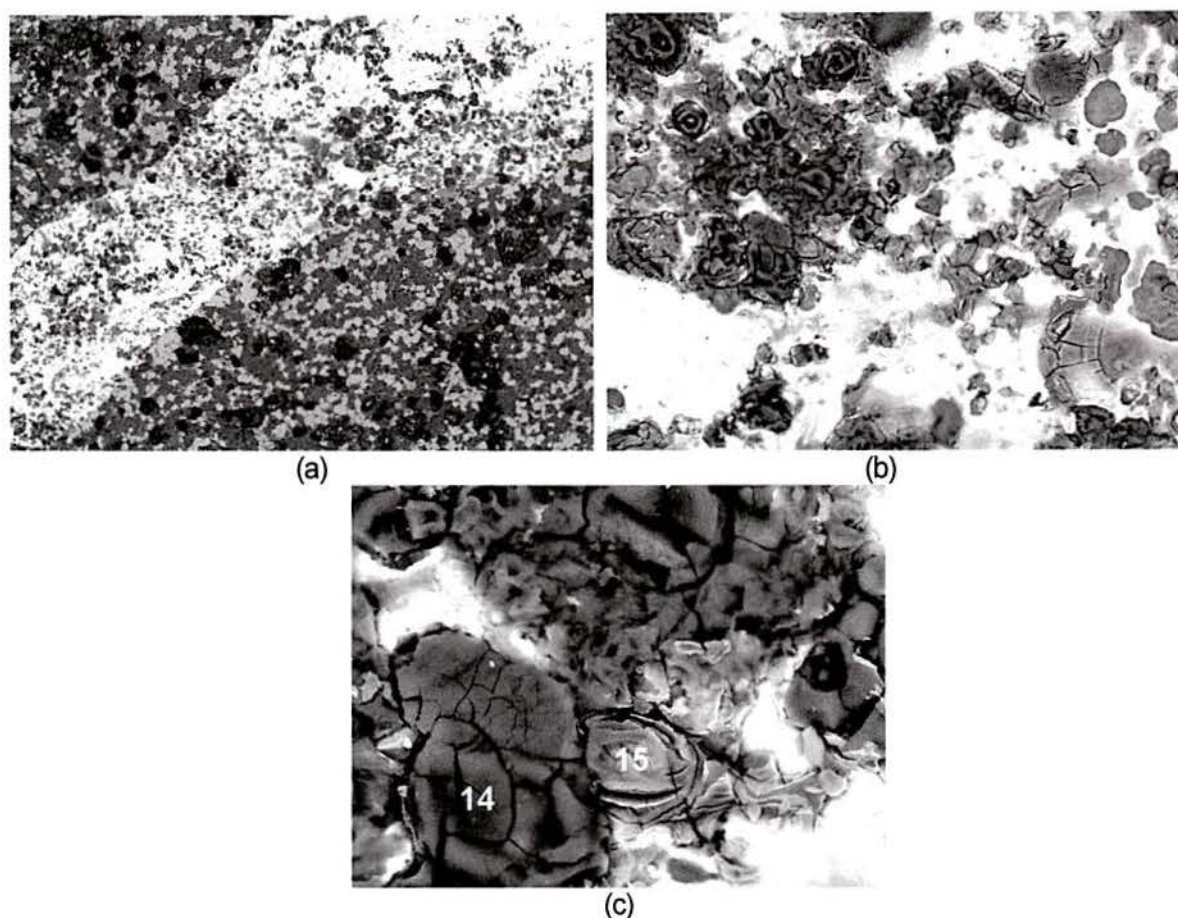
**Figura A1.23** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados da escória de aciaria elétrica com 1260 dias de idade – cura úmida (a) na borda da amostra (ampliação 170x) (b) na borda da amostra (ampliação 3000x (ampliação 170 x)



**Figura A1.24** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados da escória de aciaria elétrica com 1260 dias de idade submetida à cura em câmara climatizada (a) na borda da amostra (ampliação 1000x) (b) detalhe em ampliação de 2000x



Nesta escória, constatou-se a existência de uma grande quantidade de fase metálica, zona de coloração mais clara, que pode ser visualizada na figura A1.25. A análise química desta fase que destaca-se sobre as demais, encontra-se na tabela A1.17.



**Figura A1.25** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados da escória de aciaria elétrica com 1260 dias de idade submetida à cura em câmara climatizada (a) fase de coloração clara, zona em ferro (ampliação 75x) (b) detalhe em ampliação de 2000x (c) detalhe em ampliação de 2000x

**Tabela A1.17** Composição da escória de aciaria com 3 anos e 6 meses, curada em câmara climatizada, determinada por EDS

	Elementos (%)							
	Ca	Fe	Mg	Al	Si	Mn	C	O
10	2,23	82,26	2,0			9,17	2,22	6,75
11	42,3	40,7		6,1		0,8	2,9	3,17
12	71,8	3,0			11,7		6,6	7,5
13	72,3	2,1			12,4	8,2	8,1	10,2
14		95,7						4,3
15		98,1						1,9

Verifica-se que a fase de coloração clara, visualizada na figura A1.25 é uma fase rica em óxido de ferro

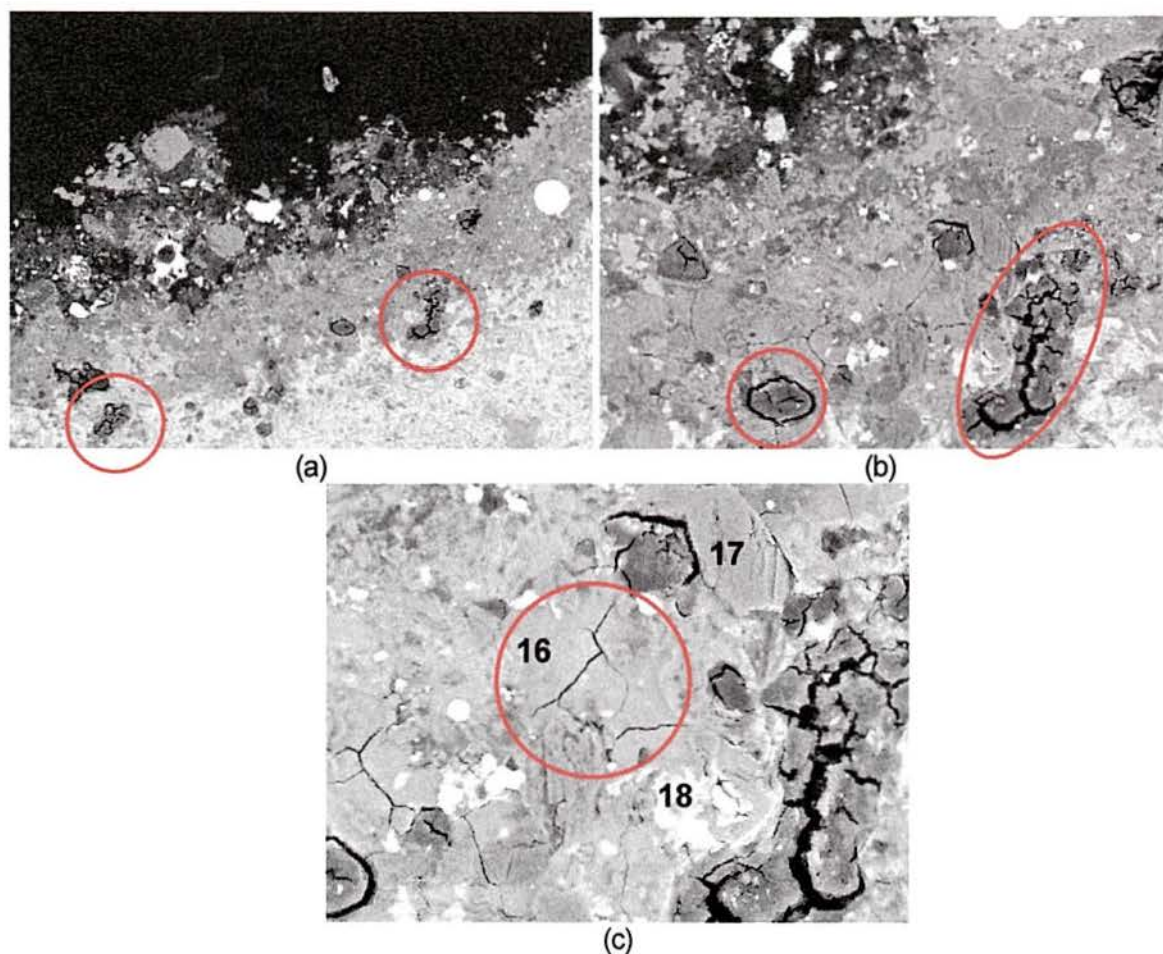


A análise da escória com 4 anos e 6 meses, do ponto de vista microestrutural, foi feita para os três tipos de cura.

Na escória exposta a condições naturais, observou-se na borda mais externa, a formação de uma envoltória, de coloração acizentada, resultante das reações da escória com o meio ambiente, tais como oxidação, hidratação ou carbonatação.

A figura A1.26 evidencia este fenômeno, que já havia sido observado na escória com 3 anos e 6 meses de idade sujeitas a mesma exposição, porém internamente.

Verifica-se que as fases de coloração mais escuras (17 e 16), ricas em cálcio, encontram-se fissuradas, como pode ser vista em detalhe na figura A1.26 (c) e cuja análise química encontra-se, encontra-se na tabela A1.18.

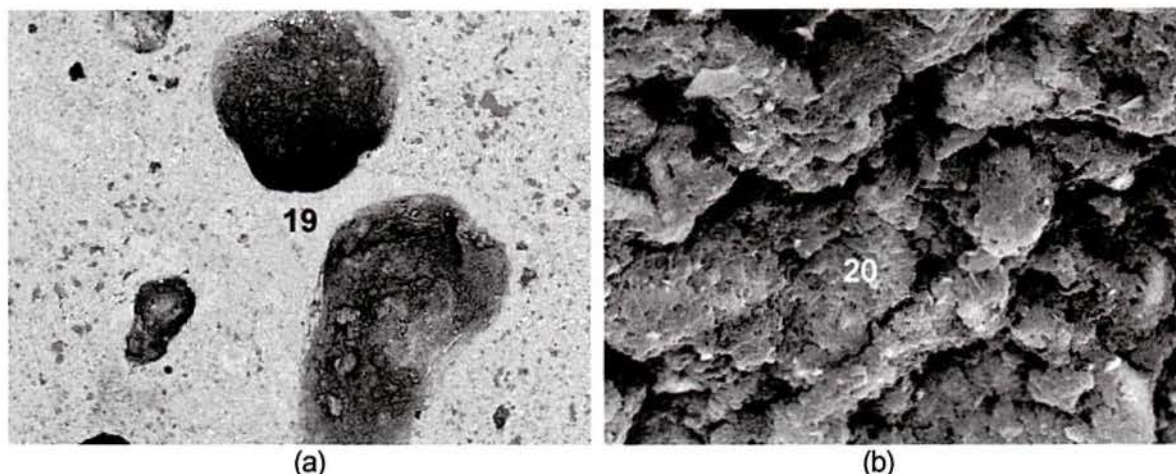


**Figura A1.26** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados da escória de aciaria elétrica com 4 anos e 6 meses – cura ao ambiente (a) zona de coloração mais escura, próxima a borda - ampliação 170x (b) detalhe da zona escura, ampliação 500 x (c) detalhe figura A1.19 - ampliação 1000x

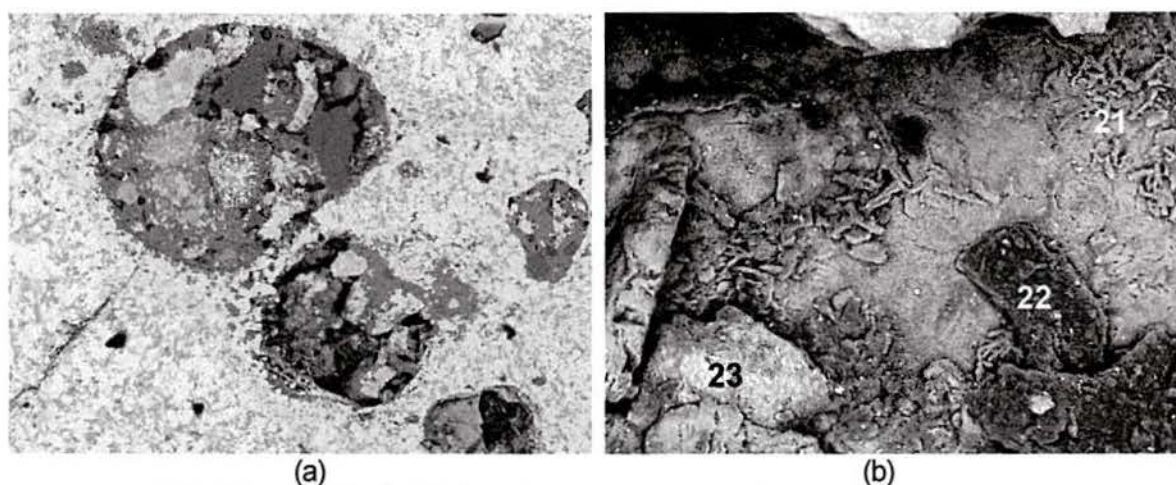
Uma segunda observação, diz respeito a presença, próximo a borda, de fases de coloração mais escura. A figura A1.27 (a) mostra o aspecto destas fases, as quais aparecem em detalhe nas figuras A1.27 (b) e A1.28.



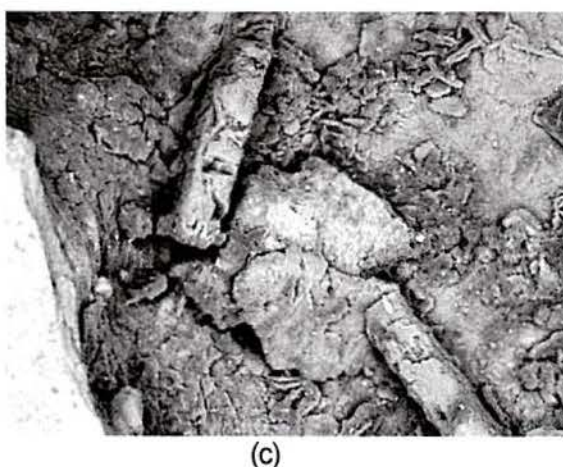
A análise química dos elementos presentes encontram-se na tabela A1.18. O elevado teor de carbono observado nos pontos 20, 21 e 22 da figura A1.28 (b), deve-se provavelmente, à contribuição da resina utilizada para embutimento da amostra.



**Figura A1.27** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados da escória de aciaria elétrica 4 anos e 6 meses – cura ao ambiente (a) zona central da, ampliação 300 x (b) 3000 x



**Figura A1.28** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados da escória de aciaria elétrica 4 anos e 6 meses – cura ao ambiente (a) zona central da amostra - ampliação 75x (b) detalhe da zona escura, ampliação 300 x (c) 2000 x



**Figura A1.29** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados. Detalhe da figura A1.28 (b)



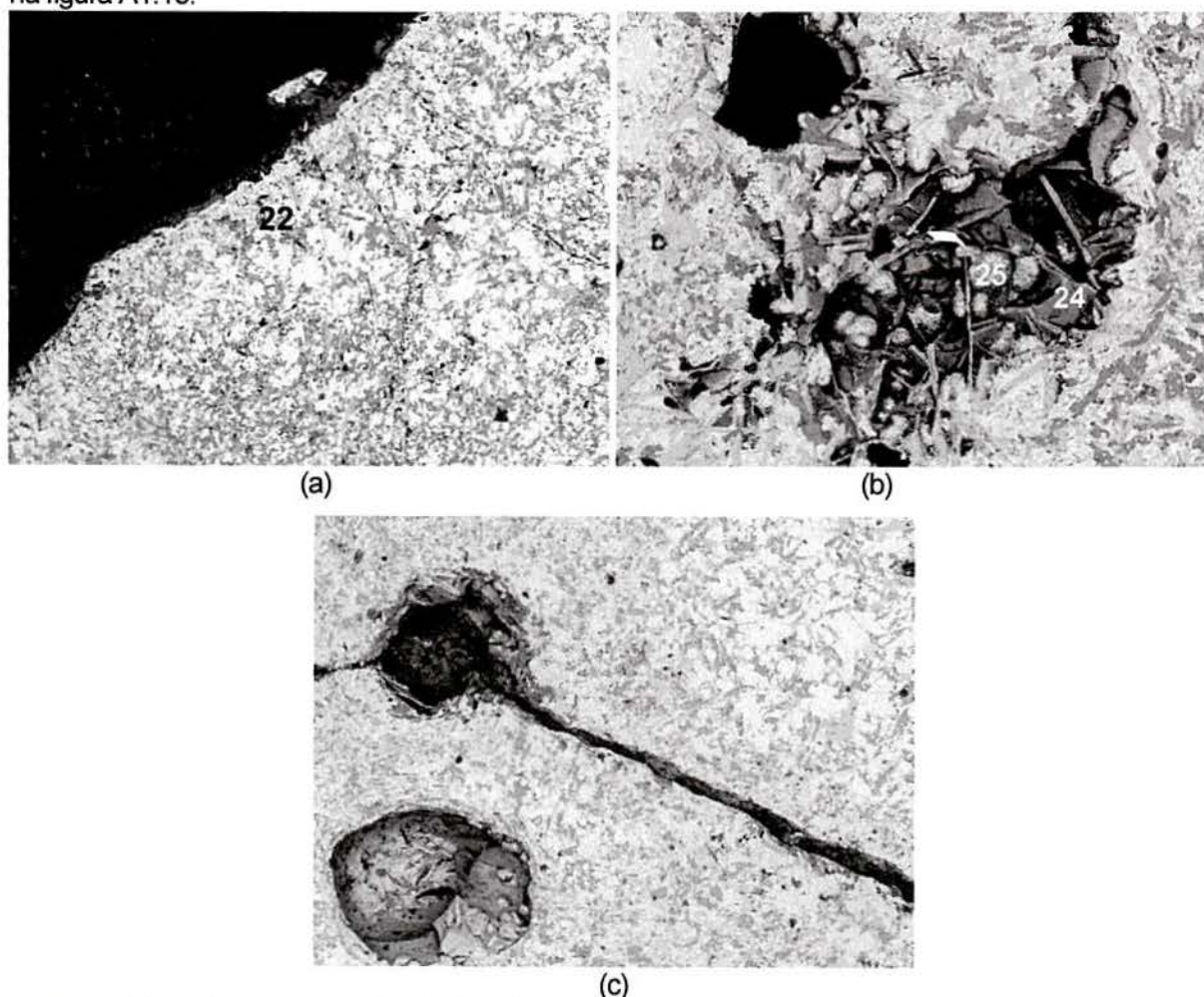
**Tabela A1.18** Composição da escória de aciaria com 4 anos e 6 meses, curada em ambiente natural, determinada por EDS

	Elementos (%)							
	Ca	Fe	Mg	Al	Si	Mn	C	O
16	33,1	2,1	7,7	1,7	26,1	6,4	2,0	21,0
17	42,3	2,6	2,7	5,13	5,7	0,32	6,6	53,4
18	3,3	7,0	52,17	0,4	3,9	11,9	3,4	11,6
19	69,5		0,5	0,5	8,4	1,5	5,1	7,1
20	32,7	3,2	1,7	2,3	4,4		32,7	28,3
21	18,0	4,5	0,7	1,2	3,1		56,0	16,3
22	7,5	4,8	0,3	0,7	1,3		71,6	13,8
23	65,3			18,6			5,4	13,4

As fissuras observadas em escórias com 3 anos e 6 meses, verificaram-se também nas escórias com 4 anos e 6 meses, porém expostas ao ambiente úmido.

A figura A1.30 exemplifica as fases presentes e fissuras existente na escória após ser submetida a 4 anos e 6 meses em câmara úmida.

A análise química por EDS, dos pontos 24 e 25 identificados na figura A1.18 está apresentada na figura A1.18.



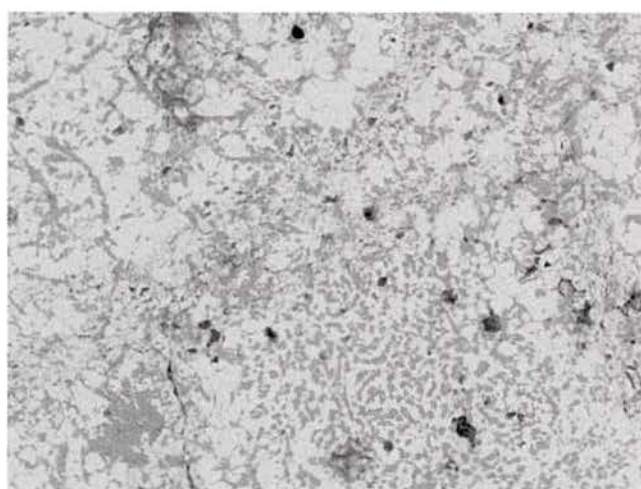
**Figura A1.30** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados da escória de aciaria elétrica com 4 anos e 6 meses de idade, exposta à câmara úmida (a) fases existentes próximas a borda - ampliação 75x (b) produtos formados no poro da escória, ampliação 300 x (c) fissuras presentes na escória

**Tabela A1.19** Composição da escória de aciaria com 4 anos e 6 meses, curada em câmara úmida, determinada por EDS

	Elementos (%)							
	Ca	Fe	Mg	Al	Si	Mn	C	O
<b>24</b>	32,8	56,4	0,2	2,5	0,9			6,7
<b>25</b>	2,2	95,0			0,4	0,2	1,1	0,7

Os produtos formados nos vazios existentes da escória, identificados na figura A1.30 é composto por uma fase essencialmente de ferro e de outro rica em ferro, mas com alto de cálcio.

A escória armazenada em câmara climatizada as fases distribuídas homogeneamente ao longo de toda escória, não verificando-se a existência de novas fases ou aparecimento de fissuras. A figura A1.31 ilustra as fases da escória exposta a este ambiente.



**Figura A1.31** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retro-espalhados da escória de aciaria elétrica com 1620 dias de idade, exposta à câmara -ampliação 75x

## A1.7 CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas verifica-se que as condições ambientais apresentam influência na composição química, mineralógica e estrutural. A seguir são apresentadas as conclusões das análises realizadas.

### A1.7.1 Do ponto de vista físico

Os resultados obtidos na análise estatística mostraram que não há influência da idade e do tipo de cura (exposição) na massa específica das escórias.



### **A1.7.2 Do ponto de vista químico**

Para o completo entendimento do comportamento dos elementos da escória ao longo do tempo, faz-se necessário que a análise química seja elementar e que sejam realizadas técnicas complementares de análise tais como difração de raios-x e microscopia eletrônica de varredura.

Do ponto de vista químico, observou-se que a idade e tipo de exposição e interação entre estas variáveis têm efeito sobre o teor de ferro e silício. No caso do primeiro, observa-se um aumento ao longo do tempo. Verifica-se que a maior taxa de ganho de massa do ferro nas primeiras idades (91 dias) é para as escórias armazenadas em ambiente úmido, seguido pelas armazenadas em câmara controlada e ambiente. Após os 3 anos e 6 meses, a escória estocada na câmara seca apresenta maior ganho de massa, ultrapassando o teor de ferro da escória armazenada nas outras situações de cura.

Quanto ao silício, há uma diminuição de massa ao longo do tempo. No final de 4 anos e 6 meses, a escória que apresentou maior perda de massa foi a estocada no ambiente úmido.

### **A1.7.3 Do ponto de vista mineralógico**

Identificou-se alguns compostos que foram encontrados em todas as idades de análise, quais sejam: wustita, magnésio-ferrita, larnita, browmillerita, cálcio-magnésio-ferro, silicato de cálcio e periclásio

Encontrou-se nas escórias com 4 anos e 6 meses compostos com características expansivas, tais como, periclásio, larnita e wustita.

Ao longo do tempo, novos compostos formaram-se: a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ),  $\text{Fe}_3\text{C}$ , magnetita,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{C}_3$ ,  $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3 \cdot x(\text{OH})_4$  e  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ . Os últimos dois compostos só foram observados após 4 anos e 6 meses de idade.

Verificou-se a existência de óxido de cálcio na escória exposta em ambiente úmido.

### **A1.7.4 Do ponto de vista microestrutural**

Microestruturalmente, observou-se que escórias expostas ao tempo apresentam a formação de uma envoltória externa, provavelmente decorrentes de reações de hidratação, carbonatação e oxidação, que não foram observadas nas escórias expostas aos demais ambientes.

Escórias expostas ao ambiente durante 3 anos e 6 meses apresentaram a formação de fissuras internas, as quais encontravam-se preenchidas por fases da escória. Este comportamento não foi observado nas escórias curadas nos outros dois ambientes, úmido e

controlado. A mesma configuração de fissuras foi encontrada em escórias armazenadas durante 4 anos e 6 meses, porém em câmara úmida.

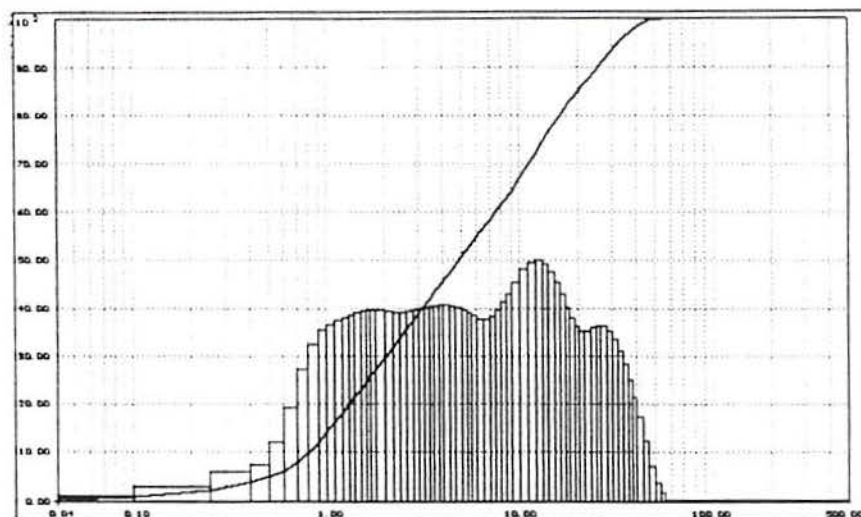
Escórias expostas em ambiente com umidade relativa mais baixa apresentaram as mesmas fases distribuídas homogeneamente ao longo de toda seção transversal.

Não se conseguiu, mediante cálculos estequiométricos estabelecer relação entre os compostos mineralógicos observados na difração de raios-x e os elementos detectados com base na análise por EDS das amostras.

Com base nos resultados obtidos e discutidos anteriormente, verifica-se que o critério de estipular-se um tempo único de armazenamento para estabilização da escória sem levar em consideração as condições atmosféricas as quais serão submetidas parece ser inadequado.

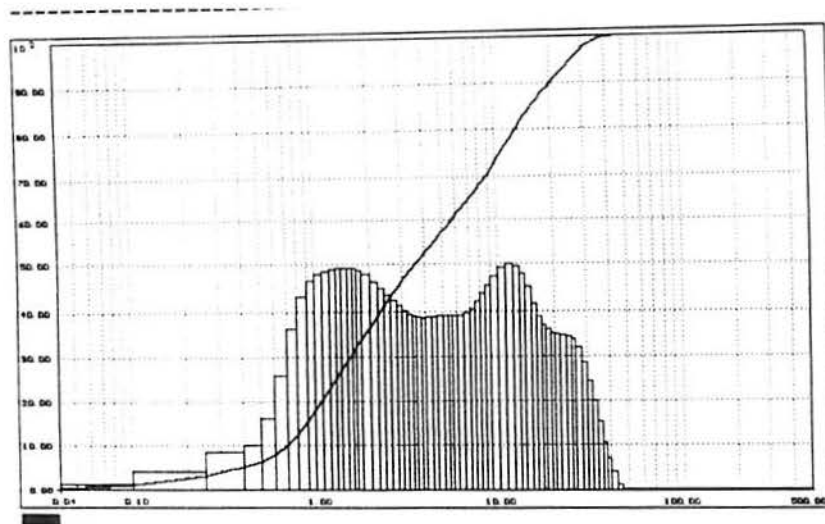


**Anexo 2:** Distribuição granulométrica da escória verde (EA3) e ACIGRAN (EA3-G)



**Figura A2.1** Distribuição granulométrica da escória granulada (EA3) moída utilizada em todos os ensaios realizados





**Figura A2.2** Distribuição granulométrica da escória granulada (EA3-G) moída utilizada em todos os ensaios realizados

**Anexo 3:** Ganho de massa por elemento de escória devido à contribuição do cado

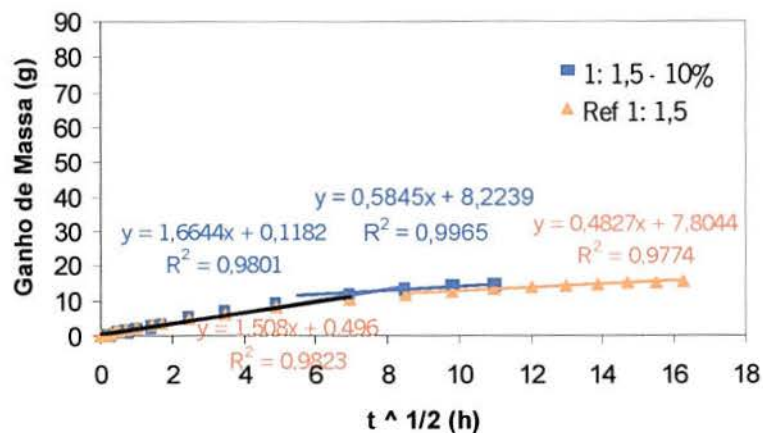


**Tabela A3.1** Ganho de massa por elemento a cada 100 g de escória

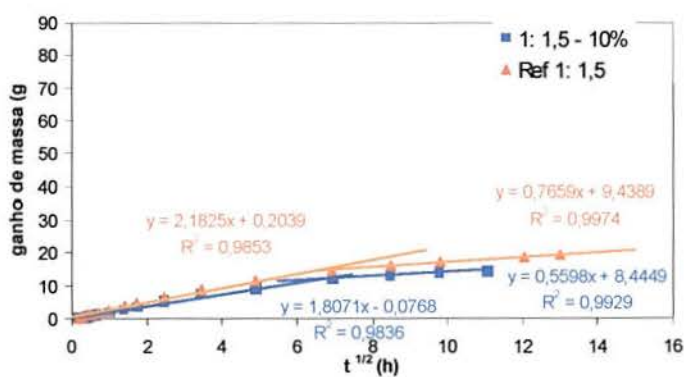
	Escória	Elemento (g)	Acigran	Peso em g	Elemento (g)	Ganho %	Ganho em g
<b>Si</b>	<b>16,080</b>	<b>7,504</b>	<b>33,077</b>	<b>23,154</b>	<b>10,805</b>	<b>43,99%</b>	<b>3,301</b>
<b>Al</b>	<b>7,220</b>	<b>3,821</b>	<b>11,504</b>	<b>8,053</b>	<b>4,262</b>	<b>11,53%</b>	<b>0,441</b>
Fe	30,360	23,599	0,806	0,564	0,439	-98,14%	
Ca	29,810	21,305	39,417	27,592	19,720	-7,44%	-1,585
<b>Mg</b>	<b>7,180</b>	<b>4,330</b>	<b>10,776</b>	<b>7,543</b>	<b>4,549</b>	<b>5,06%</b>	<b>0,219</b>
Na	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	-30,00%	0,000
K	0,036	0,030	0,110	0,077	0,064	113,89%	0,034
Ti	0,320	0,192	0,759	0,531	0,319	66,03%	0,127
V	0,100	0,056	0,049	0,034	0,019	-65,70%	-0,037
Cr	3,430	2,347	0,494	0,346	0,237	-89,92%	-2,110
Mn	4,540	3,516	3,054	2,138	1,656	-52,91%	-1,860
Pb	0,780	0,654	0,008	0,006	0,005	-99,28%	-0,649
S	0,116	0,116	0,092	0,064	0,064	-44,48%	-0,052

**Anexo 4:** Ganho de massa ao longo do tempo no ensaio de sucção capilar – Método Kelham

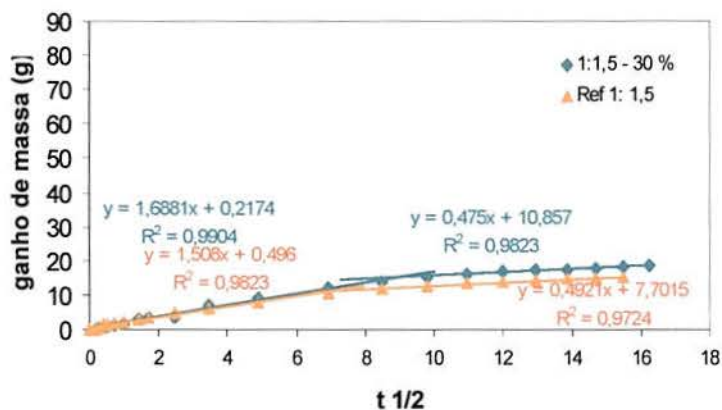




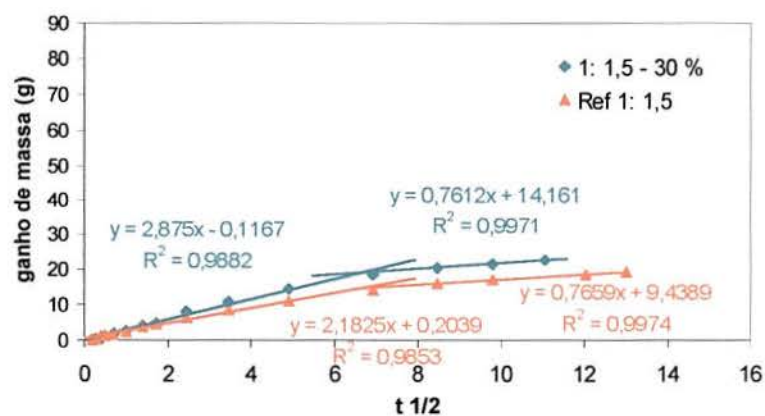
**Figura A4.1** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 1,5, com 10 % de ACIGRAN e 0% - 1º exemplar



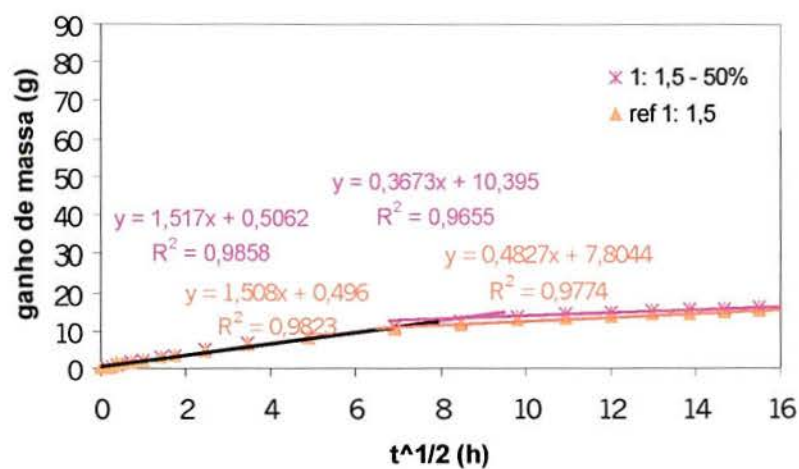
**Figura A4.2** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 1,5, com 10 % de ACIGRAN e 0% - 2º exemplar



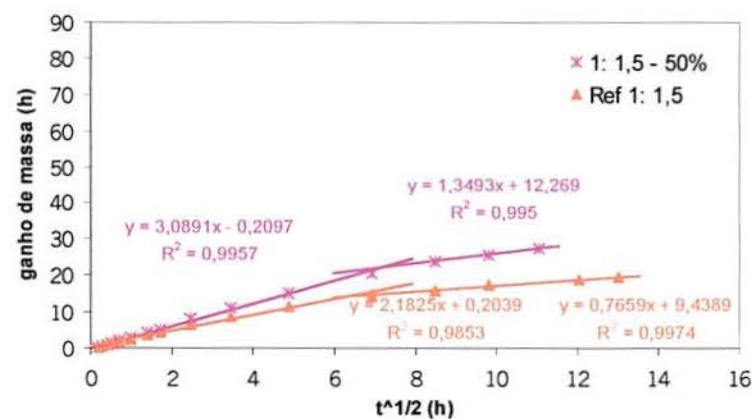
**Figura A4.3** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 3,0, com 10 % de ACIGRAN e 0% - 1º exemplar



**Figura A4.4** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 1,5, com 30 % de ACIGRAN e 0% - 2º exemplar

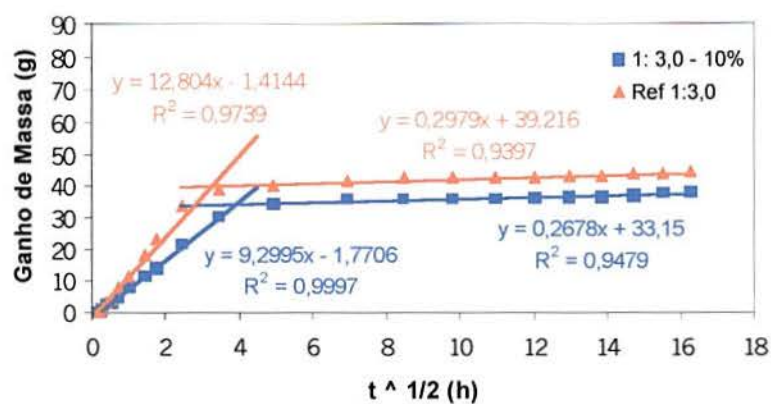


**Figura A4.5** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 1,5, com 50 % de ACIGRAN e 0% - 1º exemplar

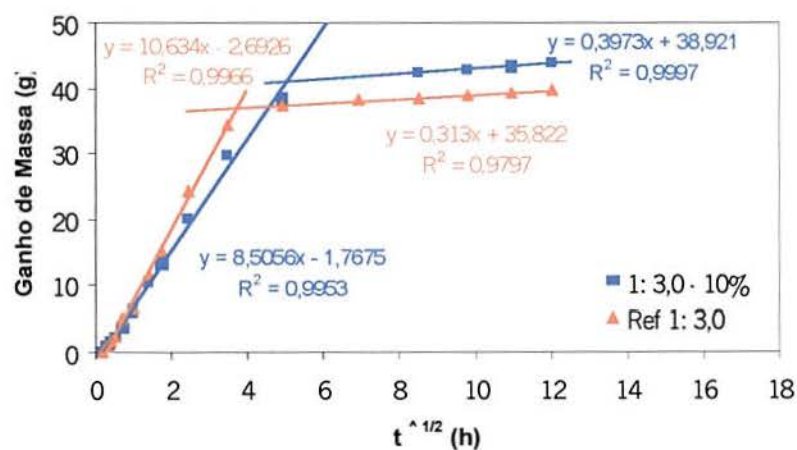


**Figura A4.6** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 1,5, com 50 % de ACIGRAN e 0% - 2º exemplar

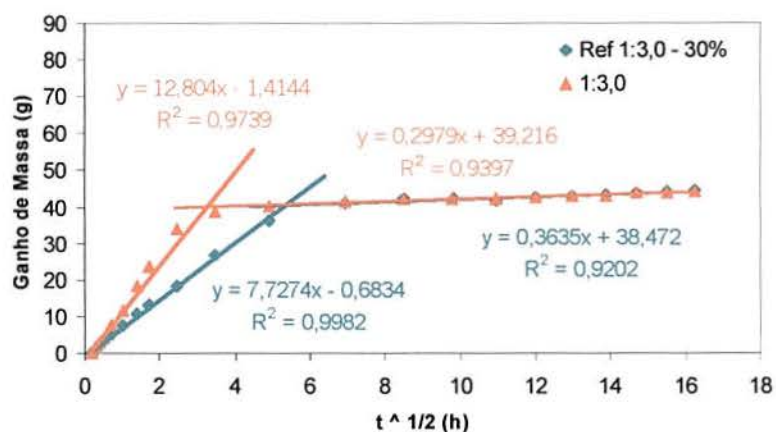




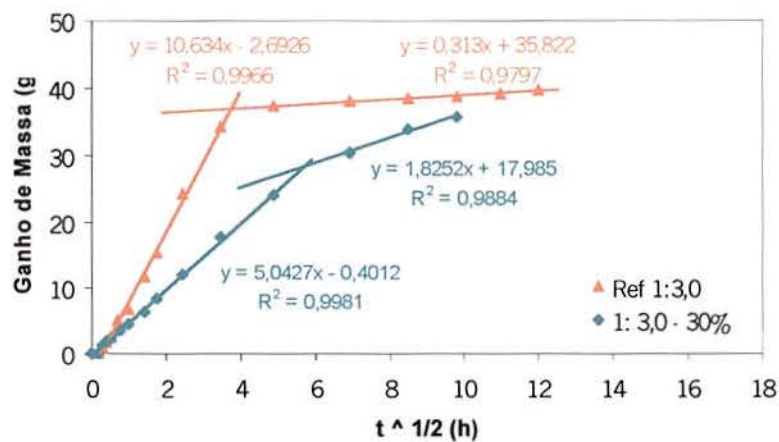
**Figura A4.7** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 3,0 com 10 % de ACIGRAN e 0% - 1º exemplar



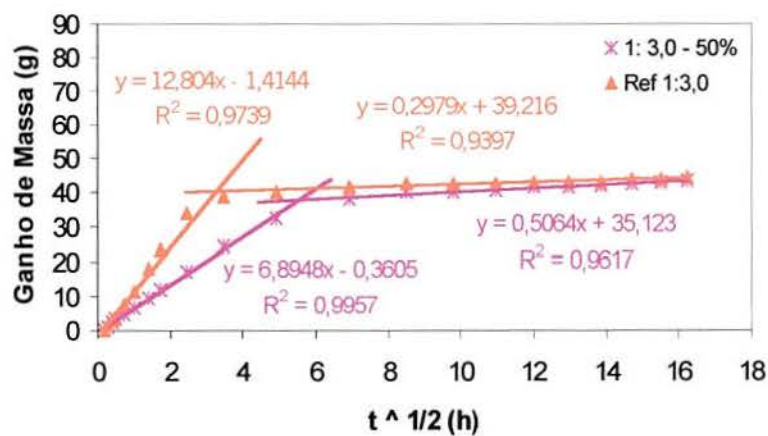
**Figura A4.8** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 3,0 com 10 % de ACIGRAN e 0% - 2º exemplar



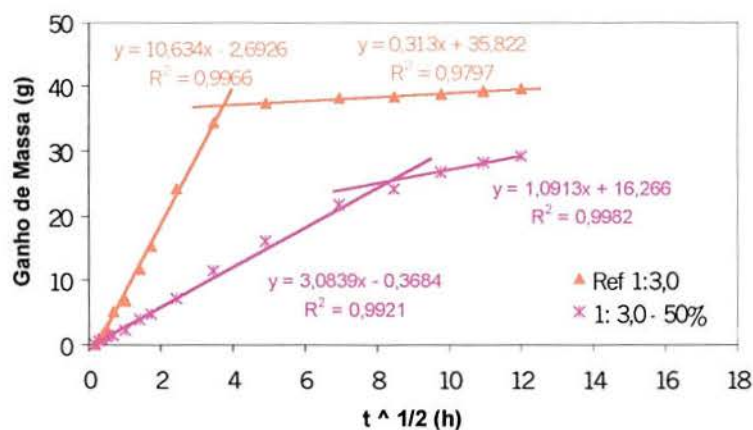
**Figura A4.9** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 3,0 com 30 % de ACIGRAN e 0% - 1º exemplar



**Figura A4.10** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 3,0 com 30 % de ACIGRAN e 0% - 2º exemplar

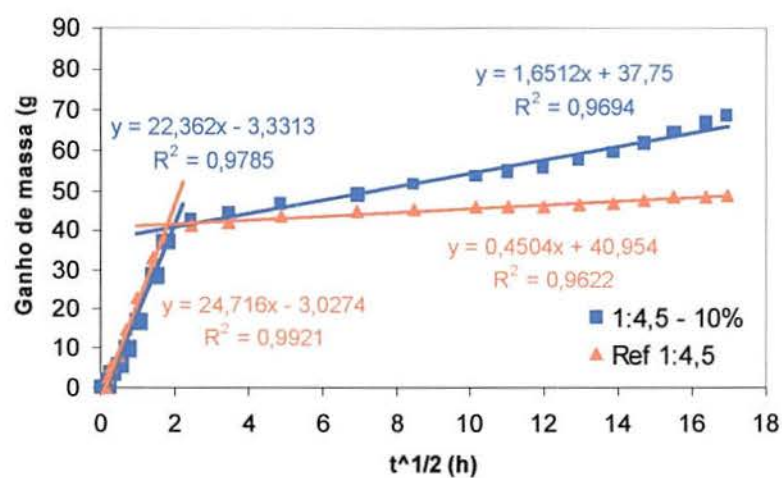


**Figura A4.11** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 3,0 com 50 % de ACIGRAN e 0% - 1º exemplar

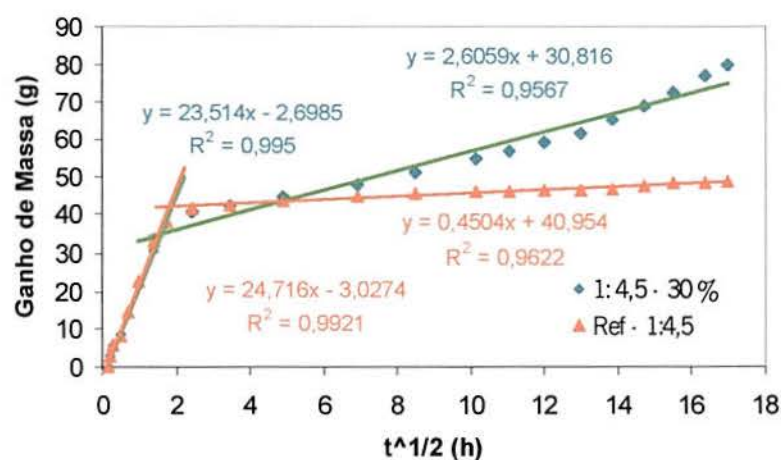


**Figura A4.12** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 3,0 com 50 % de ACIGRAN e 0% - 2º exemplar

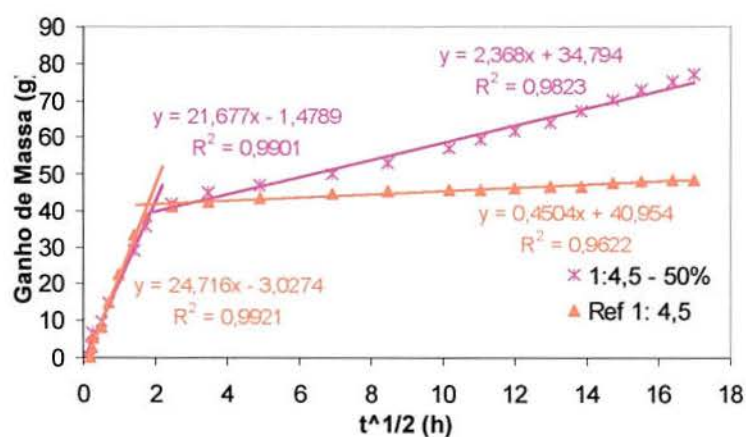




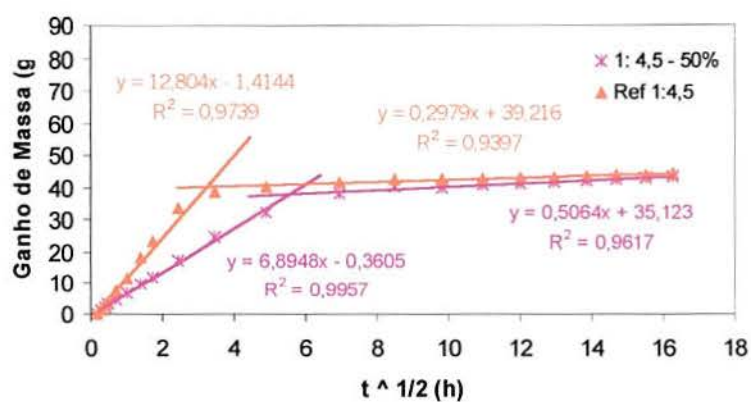
**Figura A4.13** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 4,5 com 10 % de ACIGRAN e 0% - 1º exemplar



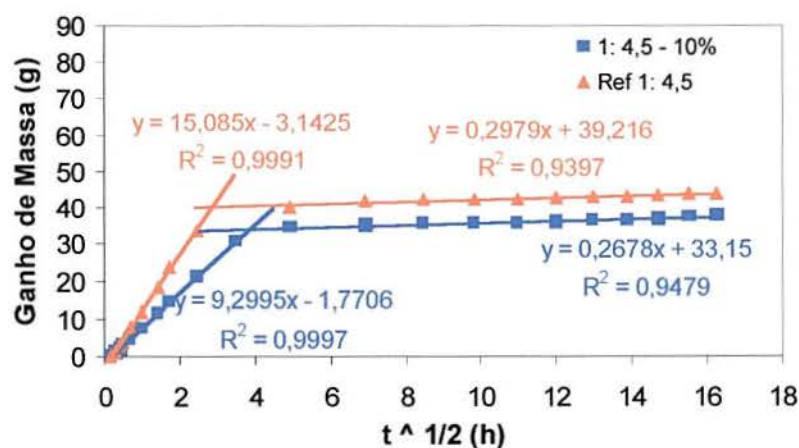
**Figura A4.14** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 4,5 com 10 % de ACIGRAN e 0% - 1º exemplar



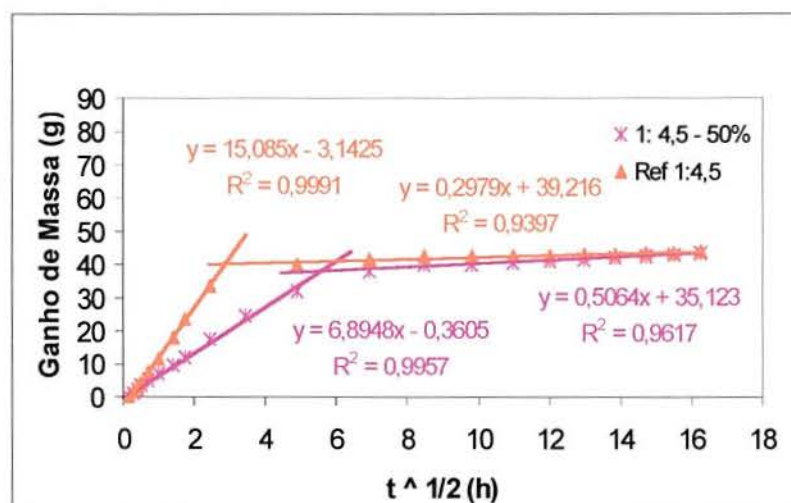
**Figura A4.15** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 4,5 com 30 % de ACIGRAN e 0% - 1º exemplar



**Figura A4.16** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 4,5 com 10 % de ACIGRAN e 0% - 1º exemplar



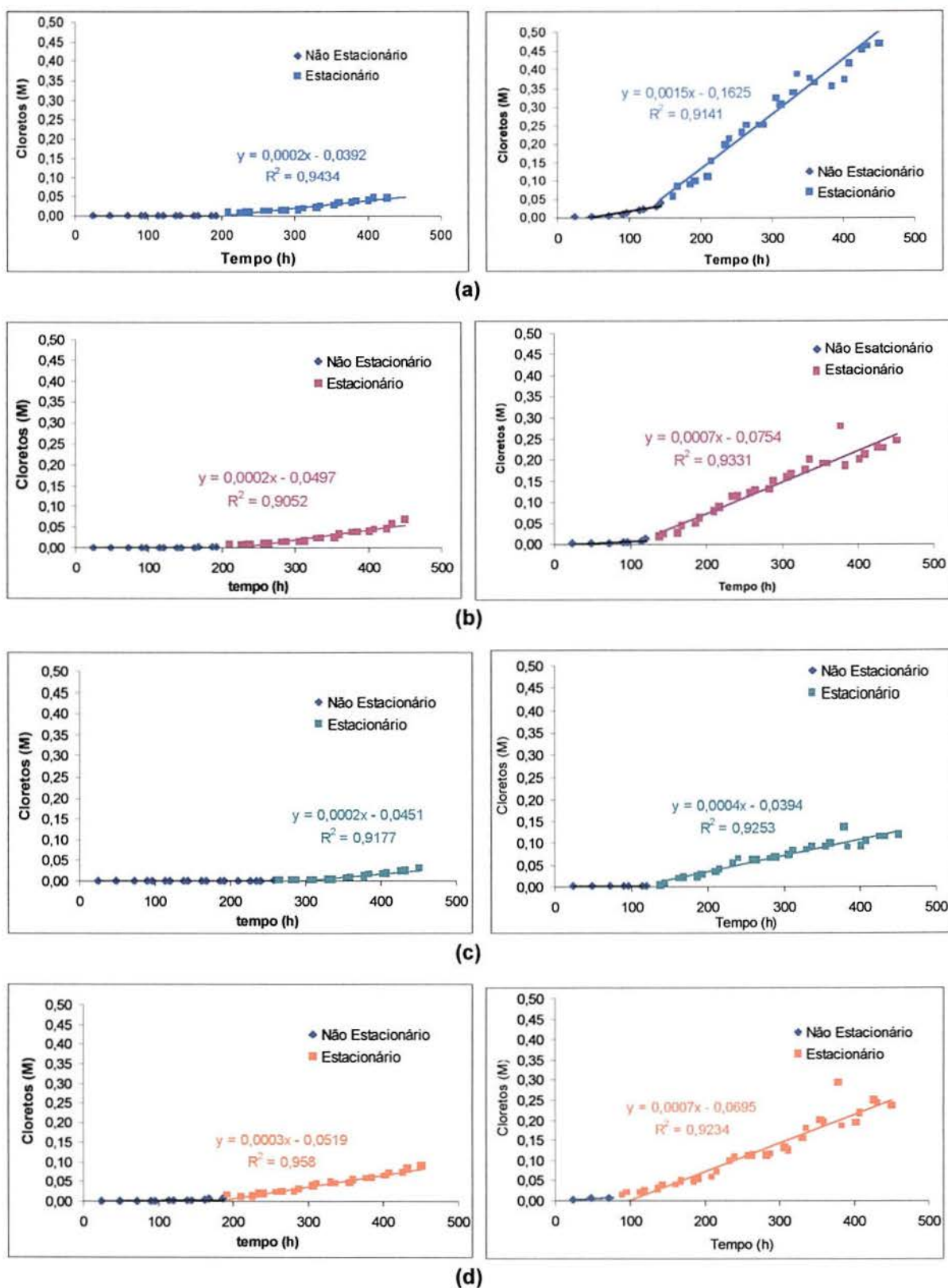
**Figura A4.17** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 4,5 com 10 % de ACIGRAN e 0% - 1º exemplar



**Figura A4.18** Ganho de massa em função  $\sqrt{t}$  para argamassas de traço 1: 4,5 com 10 % de ACIGRAN e 0% - 1º exemplar

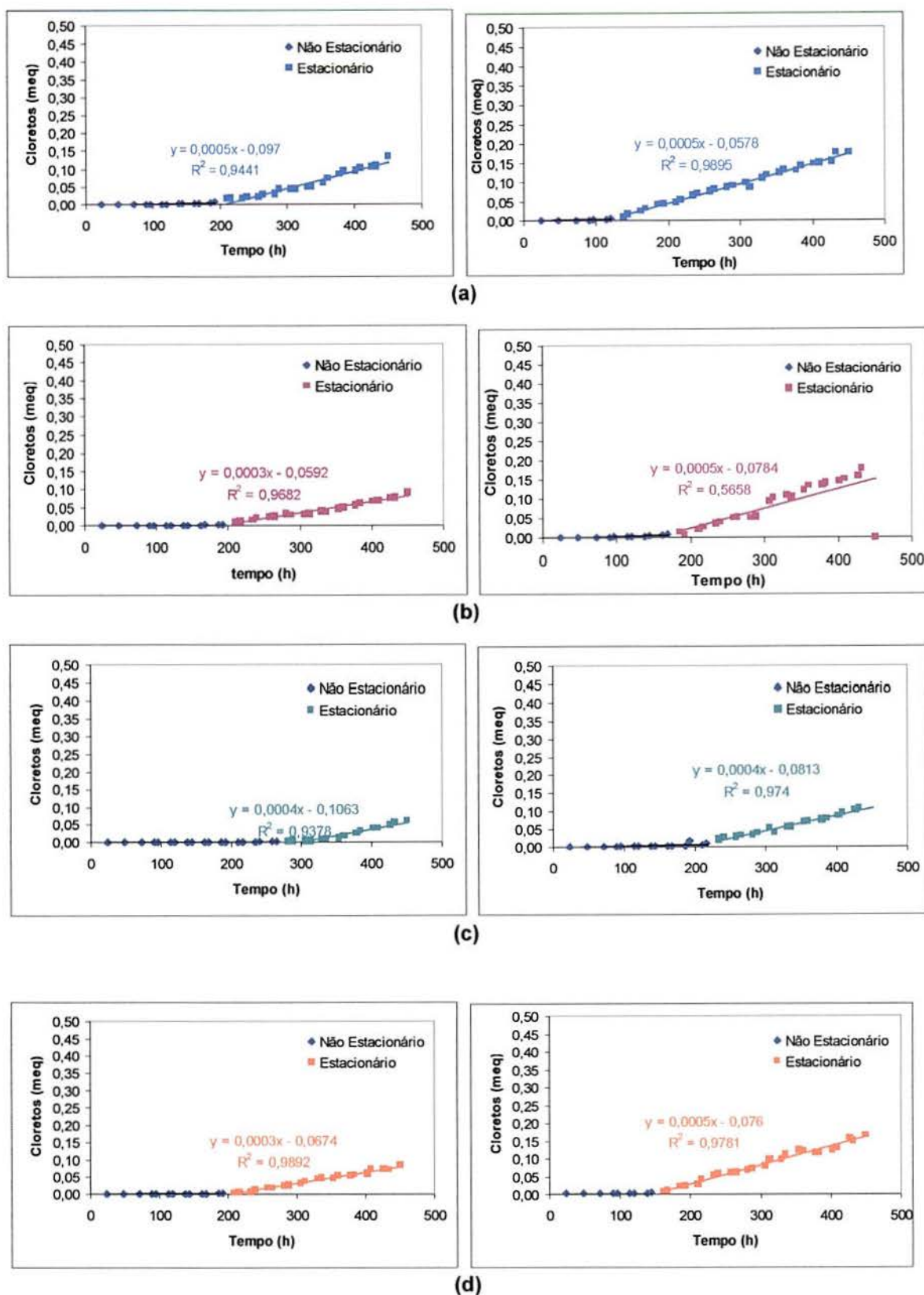


**Anexo 5:** Corrente elétrica e evolução da quantidade de cloretos ao longo do tempo por traço e teor de substituição

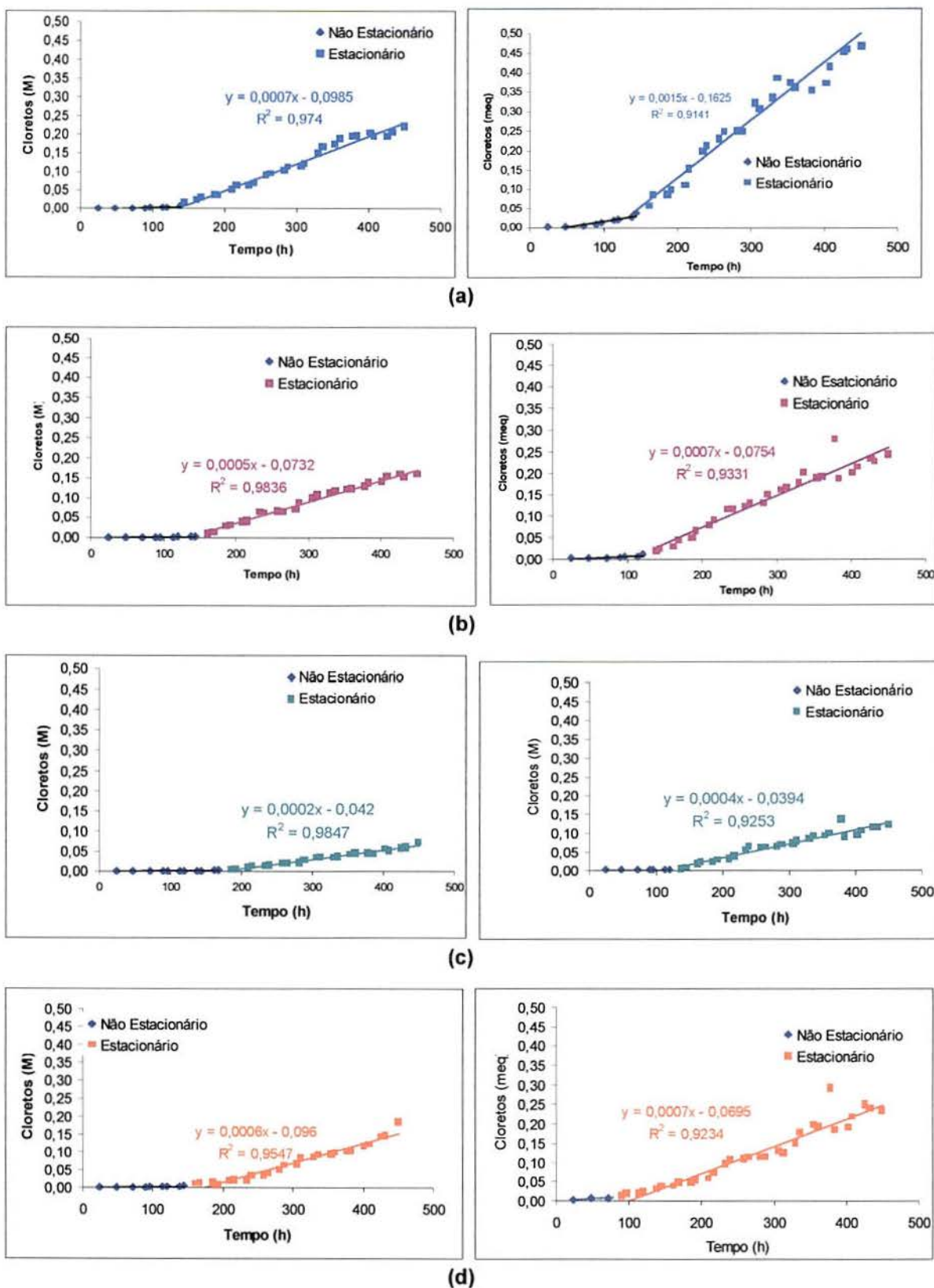


**Figura A5.1** Evolução da concentração de cloretos em argamassas 1: 1,5 – (a) 10 %; (b) 30 % (c) 50; (d) 0 %



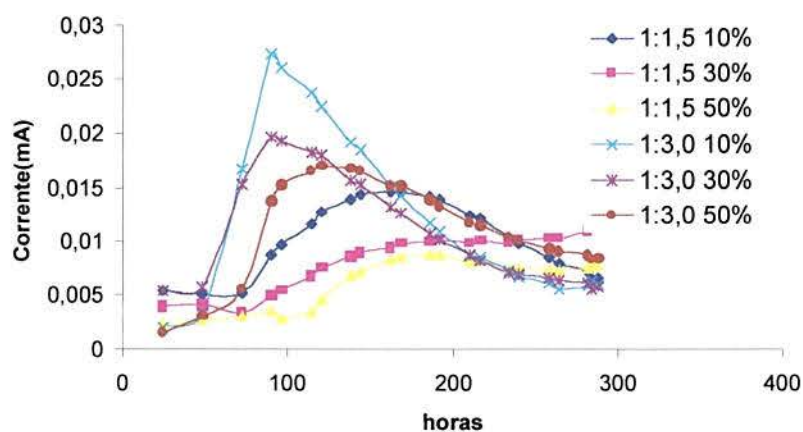


**Figura A5.2** Evolução da concentração de cloritos em argamassas 1: 3,0 – (a) 10 %; (b) 30 % (c) 50; (d) 0 %

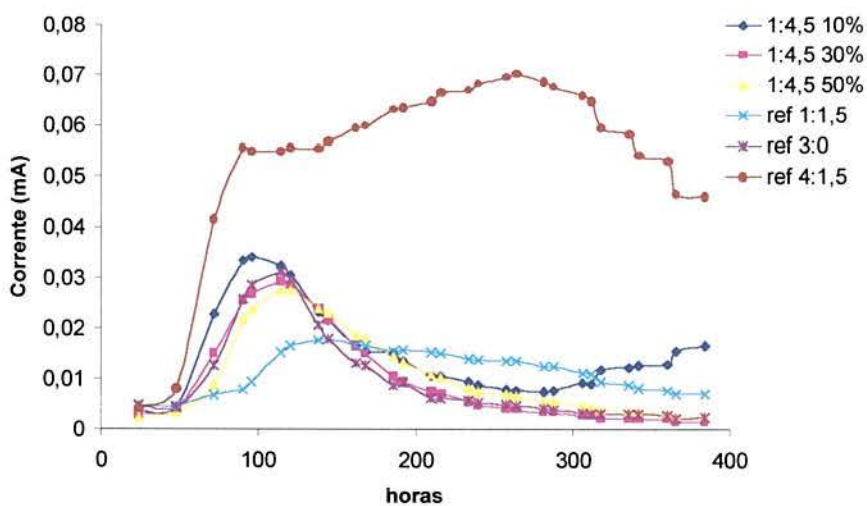


**Figura A5.3** Evolução da concentração de cloretos em argamassas 1: 4,5 – (a) 10 %; (b) 30 % (c) 50; (d) 0 %





**Figura A5.4** Corrente elétrica passante nas argamassas de traço 1:4,5 e argamassas de referência



**Figura A5.5** Corrente elétrica passante nas argamassas de traço 1:4,5 e argamassas de referência